



# MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

FORMULA 1 FRONT WING DESIGN

Autor: D.<sup>a</sup> Nerea Coronado Lorenzana

Tutor: D. Manuel San Juan Blanco

Valladolid, julio de 2017

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





### Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid  
(España)



### Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



## FRONT WING FORMULA 1 DESIGN

### RESUMEN BREVE

**Palabras clave:** Diseño, Fórmula 1, alerón delantero, aerodinámica, materiales.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo la realización de un diseño 3D de un alerón delantero de Fórmula 1 mediante Catia, atendiendo a la normativa vigente del 2017 establecida por la FIA.

En la memoria se incluye una introducción a la teoría aerodinámica y los diferentes elementos de estos vehículos. Se ha analizado la importancia de los alerones delanteros en la aerodinámica global del monoplaza, sus principales funciones y elementos y los materiales utilizados en la actualidad. Tras la realización del diseño 3D se han llevado a cabo distintos análisis que han permitido realizar la simulación de los test de flexión, establecidos por la legislación, sobre los alerones construidos con los diferentes materiales elegidos. El trabajo se ha concluido realizando una selección del material más adecuado para la fabricación de este componente y justificando su empleo a través de factores aerodinámicos, económicos y mecánicos.

## FRONT WING FORMULA 1 DESIGN

### SHORT ABSTRACT

**Keywords:** Design, Formula 1, front wing, aerodynamics, materials.

The main objective of the present work aims at the realization of a 3D design front wing of Formula 1 using Catia, according to the current regulations of 2017 established by the FIA.

The memory includes an introduction to the aerodynamic theory and the different elements of these vehicles. It has analyzed the importance of the front wing in the overall aerodynamics of the car, its main functions and elements and the materials used today. After the realization of the 3D design, different analyzes have been carried out that have allowed the simulation of the flexion tests, established by the legislation, on the ailerons constructed with the different chosen materials. The work has been concluded by making a selection of the most suitable material for the manufacture of this component and justifying its use through aerodynamic, economic and mechanical factors.

## FRONT WING FORMULA 1 DESIGN

### RESUMEN EJECUTIVO

La Fórmula 1 es la competición de automovilismo internacional más popular y prestigiosa de la actualidad. Está dirigida por Federación Internacional del Automóvil (FIA). Aunque las carreras de automóviles aparecieron a principios del siglo XX, la auténtica historia de la Fórmula 1 moderna comenzó en el año 1950. Los vehículos utilizados incorporan la última tecnología disponible, aunque siempre se encuentran limitados por la normativa vigente.

Dentro de esta disciplina, la aerodinámica se ha convertido en una parte esencial, donde cada equipo invierte grandes cantidades de dinero para su investigación y desarrollo, ya que desempeña un papel fundamental en la configuración general del vehículo. Los objetivos principales de esta parte aerodinámica son: crear carga aerodinámica para mejorar la adherencia y minimizar la resistencia aerodinámica. Debido a esto, cada temporada se diseñan nuevos alerones con nuevas mejoras que permiten optimizar las fuerzas generadas y el flujo de aire a través del vehículo. El alerón delantero es el elemento principal sobre el que se basa el equilibrio aerodinámico del Fórmula 1, debido a que es el primer componente del vehículo en contactar con el flujo de aire. Sus funciones principales son:

- Generar carga aerodinámica en el tren delantero.
- Distribuir el flujo de aire a través del vehículo.
- Conseguir que el flujo de aire sea lo más eficiente posible, desviándolo de los elementos negativos que generen resistencia.

Para guiar el flujo de aire, el alerón posee una serie de elementos aerodinámicos entre los que destacan los endplates, los flaps y los generadores de vórtices, ya que el aire turbulento que se mueve hacia la parte trasera del vehículo influirá sobre la eficiencia del alerón trasero, y de esta forma, sobre la aerodinámica global del vehículo. Otro factor importante para el rendimiento aerodinámico es su proximidad a la pista. El alerón es más eficiente si se encuentra cerca del suelo, pero también tiene unos límites, ya que si este hueco es demasiado pequeño, el flujo de aire entre ellos se detiene y el alerón entra en pérdida.

Cada equipo tiene un diseño propio de alerón delantero que está condicionado por las características del vehículo, la conducción del piloto y el circuito. Normalmente las escuderías disponen de dos o tres modelos con distintas características, lo que les permite utilizar el más conveniente sin tener que modificar el diseño global del monoplace. Las configuraciones de alerones son infinitas y han evolucionado a lo largo de los años e incluso en las mismas temporadas, ya que están condicionados por una normativa que varía de un año a otro y por las nuevas innovaciones. Además es posible la modificación de la flexibilidad del alerón, aunque está limitado por la normativa de la FIA. Esto permite que los flaps puedan comportarse de forma diferente, ofreciendo mayor carga aerodinámica en las curvas y menor resistencia al viento en las rectas. En la actualidad, estos elementos están contruidos de resina epoxi reforzada con fibra de carbono, lo que les confiere una elevada rigidez con un menor peso. Adicionalmente, se está estudiando la obtención de materiales compuestos con una flexibilidad controlada, mediante las distintas formas de orientación de las fibras utilizadas.

Tras realizar el estudio de la configuración aerodinámica global de un Fórmula 1 y la búsqueda de la normativa establecida en 2017 para las limitaciones de las dimensiones de sus elementos, se ha realizado un diseño 3D (mediante superficies en Catia) de un alerón delantero de Fórmula 1. Este modelo se ha desarrollado respetando el diseño de los alerones actuales para favorecer la aerodinámica deseada. El alerón produce mayor carga aerodinámica al aumentar el ángulo de ataque de sus elementos aerodinámicos. Sin embargo es conveniente optimizar este ángulo y el tamaño de los elementos, ya que si se aumenta demasiado puede provocar que el flujo de aire de la parte inferior se separe, entrando en pérdida, y pierda la mayor parte de carga aerodinámica que pueda generar. Para evitar esto, se sustituyen los elementos de gran tamaño por una serie de elementos pequeños, con lo que aparece una ranura entre ellos que permite que pase el flujo de aire bajo estos elementos y se

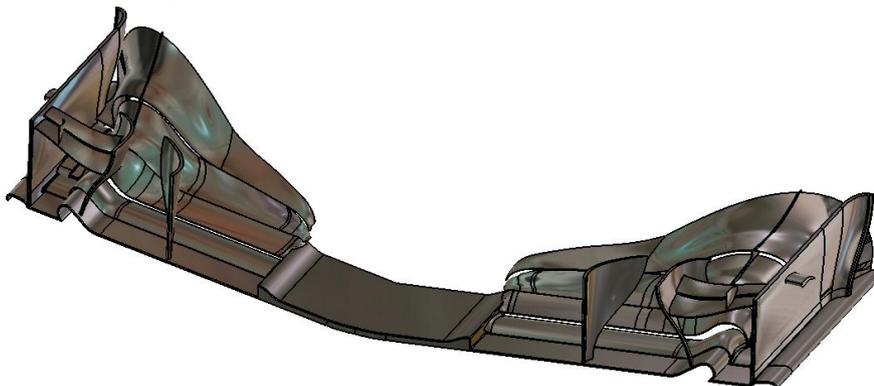
mantenga pegado a los mismos. Por esta razón, el alerón está diseñado con cinco perfiles aerodinámicos, los cuales van aumentando el grado de curvatura y su altura, siendo los primeros de menor inclinación que los más traseros.

En la Fórmula 1 se realizan ciertos test sobre los alerones delanteros para controlar la flexibilidad de los materiales y con ello la generación de downforce adicional. En el primer test se aplica una carga de 1000 Newton (flexión máxima permitida de 15 mm) sobre el plano principal del alerón, y en el segundo test, una carga de 60 Newtons (flexión máxima permitida de 5 mm) sobre los laterales del alerón.

Aunque en la actualidad los alerones están fabricados de resina epoxi reforzada con fibra de carbono, para la realización de las simulaciones, se han elegido tres materiales en los cuales varían las propiedades mecánicas, lo que ha permitido estudiar el comportamiento al variar ciertos parámetros. En las simulaciones realizadas aplicando cargas sobre distintas zonas del alerón para la realización de los test de flexión (según la normativa establecida por la FIA), se ha observado que las menores flexiones aparecen en el componente de aluminio, seguido por el de fibra de carbono, y obteniendo unos resultados más negativos para la fibra de vidrio, ya que ha duplicado los límites de flexión permitidos. Debido a factores de peso y propiedades mecánicas se han descartado los materiales de aluminio y fibra de vidrio, realizando posteriormente el desarrollo de un nuevo material a partir del actual de epoxi-carbono, haciendo variar sólo su módulo elástico. Al aumentar el módulo de Young en este material, la deformación experimentada al aplicar la misma disminuye, lo que ha permitido someter al material a las cargas y cumplir los límites de los valores de desplazamientos establecidos por la normativa impuesta por la FIA. Por lo tanto el alerón será de este nuevo material, el cual posee elevada rigidez, bajo peso y buenas propiedades mecánicas.

	1000 N – (Límite 15 mm)	60 N – (Límite 5 mm)
	Desplazamiento	Desplazamiento
<b>Epoxi – Carbono</b>	18.7 mm	6.52 mm
<b>Epoxi – Vidrio</b>	32.5 mm	11.3 mm
<b>Aluminio</b>	3.74 mm	1.3 mm
<b>Nuevo Epoxi – Carbono</b>	14.3 mm	4.97 mm

Debido al conjunto de las características presentadas, el diseño más adecuado sería la fabricación de un alerón de fibra de carbono, el cual presenta cierto grado de flexión (por sus propiedades mecánicas y orientación de las fibras), lo cual es una característica buscada por las escuderías para aumentar la generación de carga aerodinámica durante las carreras, ya que por las normativas establecidas el alerón no debe poseer elementos móviles. Aunque es el material elegido de mayor coste, sus propiedades justifican el precio, siendo un factor secundario en este tipo de competiciones, donde lo principal es poseer los mejores diseños y materiales para dominar en las carreras.



## FRONT WING FORMULA 1 DESIGN

### EXECUTIVE ABSTRACT

Formula 1 is the most popular international motorsport competition. It is managed by the International Automobile Federation (FIA). Although car racing appeared in the early 20th century, the true history of Formula 1 began in 1950. The vehicles incorporated the latest technology available, but are always limited by the current normative.

Aerodynamics has become an essential part in this discipline, where each team invests large amounts of money for its development, as it plays a fundamental role in the overall configuration of the vehicle. The main objectives of this aerodynamic part are: generate downforce to improve the grip and minimize aerodynamic drag. Because of this, new wings are designed each season with new improvements that allow optimizing the forces generated and the air flow through the vehicle. The front wing is the main element on which the aerodynamic balance of Formula 1 is based, because it is the first component of the vehicle in contact with the air flow. Its main functions are:

- Generate downforce on the front.
- Distribute the airflow through the vehicle.
- Make the airflow as efficient as possible, diverting it from the negative elements that generate resistance.

To guide the air flow, the front wing has aerodynamic elements like endplates, flaps and vortex generators, as the turbulent air moving towards the rear of the vehicle will influence the efficiency of the rear wing, and thus on the overall aerodynamics of the vehicle. Another important factor for aerodynamic performance is its proximity to the track. The front wing is more efficient if it is near to the ground, but also has limits, because if this gap is too small, the air flow between them stops and the front wing stalls.

Each team has its own front wing design that is conditioned by the characteristics of the vehicle, the driving of the pilot and the circuit. Usually the teams have two or three models with different characteristics, which allows them to use the most convenient without having to modify the overall design of the car. There are many possible configurations of front wing and have evolved over the years, since they are conditioned by changing regulations and by new innovations. It is also possible to modify the flexibility of the front wing, although it is limited by FIA regulations. This allows the flaps to behave differently, offering greater aerodynamic load on the curves and less wind resistance on the straights. At present, these elements are constructed of carbon fiber reinforced epoxy, which gives them a high rigidity with a lower weight. In addition, the production of composite materials with controlled flexibility is being studied through the different orientation patterns of the fibers used.

After doing the study of the global aerodynamic configuration of a F1 and the search of the 2017 normative for the limitations of the dimensions of the elements, a 3D design (Catia surfaces) of a front wing of Formula 1 has developed. This model has been created respecting the design of the current front wings to favor aerodynamics. The front wing generates greater downforce by increasing the angle of attack of its aerodynamic elements. However, it is desirable to optimize this angle and the size of the elements, because if it is increased too much it can cause the bottom air flow to separate, stalling, and lose most of the downforce that it can generate. To avoid this, the large elements are replaced by a series of small elements, whereby a gap appears between them that allows the air to pass under these elements and stay stuck to them. For this reason, the wing is designed with five aerodynamic profiles, which increase the degree of curvature and its height, being the first of less inclination than the more rear ones.

In Formula 1 tests are performed on the front wing to control the flexibility of the materials and with it the generation of additional downforce. In the first test a load of 1000 Newton (maximum allowed flexion of

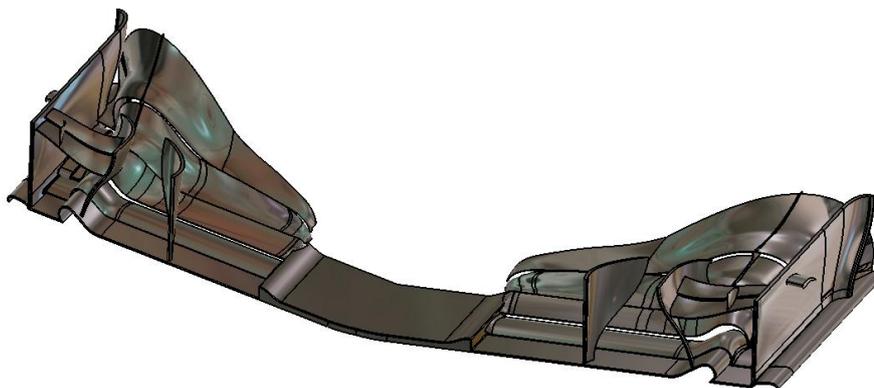
15 mm) is applied on the main plane of the wing, and in the second test, a load of 60 Newtons (maximum allowed flex of 5 mm) on the sides of the wing .

En las simulaciones realizadas aplicando cargas sobre distintas zonas del alerón para la realización de los test de flexión (según la normativa establecida por la FIA), se ha observado que las menores flexiones aparecen en el componente de aluminio, seguido por el de fibra de carbono, y obteniendo unos resultados más negativos para la fibra de vidrio, ya que ha duplicado se ha observado que las menores flexiones aparecen en el componente de aluminio, seguido por el de fibra de carbono los límites de flexión permitidos.

Although the wings are currently made of carbon fiber reinforced epoxy, to make the simulations, three materials have been chosen in which the mechanical properties change, which has allowed to study the behavior when varying some parameters. In the simulations carried out by applying loads on different areas of the front wing for the realization of the flexion tests (according to the FIA's regulation), it has been observed that the smaller flexions appear in the aluminum component, followed by carbon fiber, and obtaining more negative results for glass fiber, since it has doubled the limits of allowed flexion. Due to factors of weight and mechanical properties have been ruled out the materials of aluminum and glass fiber, subsequently making the development of a new material from the current epoxy-carbono, changing only its elastic modulus. By increasing Young's modulus in this material, the deformation experienced by applying it decreases, the deformation experienced when applying the same decreases, which has allowed to subject the material to the loads and to satisfy the value limits of displacements established by the FIA normative. Therefore the front wing will be of this new material, which has high rigidity, low weight and good mechanical properties.

	1000 N – (Limit 15 mm)	60 N – (Limit 5 mm)
	Displacement	Displacement
<b>Epoxy – Carbon</b>	18.7 mm	6.52 mm
<b>Epoxy – Glass</b>	32.5 mm	11.3 mm
<b>Aluminium</b>	3.74 mm	1.3 mm
<b>New Epoxi – Carbon</b>	14.3 mm	4.97 mm

Due to the set of characteristics presented, the most appropriate design would be the carbon fiber front wing, which presents a certain degree of flexion (due to its mechanical properties and fiber orientation), which is a characteristic sought by the teams to increase the generation of downforce during the races, since regulations spoiler must not have moving parts. Although it is the most expensive material chosen, its properties justify the price, being a secondary factor in this type of competitions, where the main thing is to have the best designs and materials to win the races.





## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes y justificación del TFM.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Alcance y desarrollo del TFM.....	1
2	ESTADO DEL ARTE .....	3
2.1	Antecedentes de la Fórmula 1 .....	3
2.1.1	Las primeras carreras de la historia .....	3
2.1.2	El primer Gran Premio .....	3
2.1.3	Desarrollo de circuitos.....	4
2.1.4	La 2ª Guerra Mundial .....	5
2.1.5	La creación de la Fórmula 1.....	6
2.2	Evolución de los vehículos de Fórmula 1 .....	6
2.2.1	Los primeros coches de Fórmula 1 .....	6
3	AERODINÁMICA.....	19
3.1	Introducción a la aerodinámica .....	19
3.1.1	Teorema de Bernoulli.....	20
3.1.2	Ecuación de continuidad .....	21
3.1.3	Efecto Venturi.....	21
3.1.4	Flujos viscosos.....	22
3.1.5	Capa límite y desprendimiento .....	23
3.1.6	Fuerzas .....	25
3.1.7	Resistencia .....	26
3.1.8	Carga aerodinámica.....	28
3.1.9	Alerones.....	29
3.2	Elementos aerodinámicos en un Fórmula 1 .....	30
3.2.1	Alerón delantero.....	30
3.2.2	Carenado .....	31
3.2.3	Aletas de nariz .....	32
3.2.4	Deflectores laterales .....	32
3.2.5	Casco.....	33
3.2.6	Toma de admisión y anclaje.....	34
3.2.7	Pontones.....	35
3.2.8	Aletas de pontón .....	36
3.2.9	Tapa motor.....	36
3.2.10	Alerón trasero.....	37
3.2.11	Fondo plano .....	38
3.2.12	Difusor.....	39

4	ALERÓN DELANTERO.....	41
4.1	Variación del ángulo de ataque del alerón delantero .....	42
4.2	Funciones .....	43
4.3	Elementos del alerón delantero .....	45
4.3.1	Mainplane .....	46
4.3.2	Endplates .....	46
4.3.3	Wing Flaps .....	47
4.3.4	Turning vanes .....	48
4.3.5	Técnicas de control de flujo.....	49
4.3.5.1	Generadores de vórtice .....	49
4.3.5.2	Elementos de soplado / succión .....	53
4.3.5.3	Superficies móviles.....	53
5	MATERIALES.....	55
5.1	Materiales compuestos .....	55
5.2	Fibra de carbono .....	56
5.2.1	Propiedades .....	57
5.2.2	Fabricación de la fibra de carbono .....	57
5.3	Flexibilidad en los alerones.....	58
5.3.1	Problemática .....	60
6	DISEÑO .....	63
6.1	Diseño 3D .....	63
6.2	Test de flexión.....	68
6.2.1	Materiales .....	68
6.2.2	Simulación .....	68
7	CONCLUSIONES.....	75
7.1	Conclusiones .....	75
7.2	Sugerencias para trabajos futuros .....	77
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig 1. Marcel Renault durante la carrera París-Madrid  
Fig 2. Ferenc Szisz ganó el 1º Gran Premio de la historia.  
Fig 3. La AIACR reguló el tamaño del motor y el peso.  
Fig 4. La famosa curva antes del casino de Montecarlo.  
Fig 5. Evolución de la Fórmula 1.  
Fig 6. Alfa Romeo 158.  
Fig 7. Mercedes W196.  
Fig 8. Fórmula 1 con motor trasero.  
Fig 9. Lotus 25 de chasis monocasco de aluminio.  
Fig 10. Vehículo de F1 con los primeros alerones.  
Fig 11. Lotus con doble alerón.  
Fig 12. Elementos de refrigeración en la parte anterior y en los laterales (izq.) y toma de aire detrás del piloto (drch.).  
Fig 13. Tyrrell P34.  
Fig 14. Lotus con el diseño del efecto suelo (arriba) y Renault con motor turbo (abajo).  
Fig 15. Fórmula 1 típico de los años 70.  
Fig 16. Chasis monocasco McLaren de fibra de carbono.  
Fig 17. Fórmula 1 sin alerón delantero (izq.) y Fórmula 1 con parte trasera alargada (drch.).  
Fig 18. McLaren MP4/4 (arriba) y Fórmula 1 con la toma de aire detrás del cockpit (abajo).  
Fig 19. Estructura delantera más elevada (diseño de los años 90).  
Fig 20. Deflector de viento lateral.  
Fig 21. F1 tras la prohibición de los sistemas electrónicos (arriba) y accidente de Barrichelo en GP San Marino (abajo).  
Fig 22. F1 con más elementos de seguridad.  
Fig 23. Neumáticos con ranuras.  
Fig 24. F1 con diferentes alerones antes del cambio de reglamento.  
Fig 25. F1 después del reglamento de 2009.  
Fig 26. Aleta de tiburón.  
Fig 27. Red Bull atacando con el alerón trasero abierto y Ferrari con el alerón en posición neutra.  
Fig 28. Formula 1 con parte delantera escalonada.  
Fig 29. Fórmula 1 con motor híbrido 1.6 litros (arriba) y Lotus con nuevo diseño delantero (abajo).  
Fig 30. Diseño Mercedes.  
Fig 31. Diferencias 2016 y 2017.  
Fig 32. Diagrama del Teorema de Bernoulli.  
Fig 33. Conducto Ecuación de continuidad.  
Fig 34. Esquema del efecto Venturi.  
Fig 35. Diagrama de flujo ideal.  
Fig 36. Diagrama de flujo real y desprendimiento.  
Fig 37. Desprendimiento de la capa límite.  
Fig 38. Transición de capa límite laminar a turbulenta.  
Fig 39. Diagrama de velocidades de la capa límite.  
Fig 40. Descomposición de la fuerza aerodinámica.  
Fig 41. Componentes de la fuerza aerodinámica en un Fórmula 1.  
Fig 42. Gráfica del coeficiente de resistencia.  
Fig 43. Gráfica del coeficiente aerodinámico.  
Fig 44. Recorrido del flujo de aire a lo largo del ala de un avión.  
Fig 45. Fuerzas aerodinámicas en una aeronave y en un F1.  
Fig 46. Alerón delantero.  
Fig 47. Carenado.

- Fig 48. *Aletas.*
- Fig 49. *Deflectores laterales.*
- Fig 50. *Casco.*
- Fig 51. *Líneas de corriente alrededor del casco.*
- Fig 52. *Toma de admisión.*
- Fig 53. *Pontones.*
- Fig 54. *Aletas de pontón.*
- Fig 55. *Tapa motor.*
- Fig 56. *Alerón trasero.*
- Fig 57. *Alerón trasero F1.*
- Fig 58. *Fondo plano.*
- Fig 59. *Difusor.*
- Fig 60. *Esquema alerón delantero de F1 y el flujo del aire.*
- Fig 61. *Esquema de presiones para la generación de downforce.*
- Fig 62. *Desviación del flujo de aire mediante el alerón delantero.*
- Fig 63. *Impacto frontal.*
- Fig 64. *Diferentes tipos de alerones según el equipo.*
- Fig 65. *Partes principales del alerón delantero.*
- Fig 66. *Mainplane.*
- Fig 67. *Flujo de aire alrededor del endplate.*
- Fig 68. *Turning vanes BMW 2007.*
- Fig 69. *Turning vanes Ferrari.*
- Fig 70. *Formación de vórtice en el borde del perfil.*
- Fig 71. *Componentes del front wing.*
- Fig 72. *Vórtice creado en la parte interna de la rueda.*
- Fig 73. *Turning vanes.*
- Fig 74. *Línea de recorrido del vórtice Y250.*
- Fig 75. *Vórtices interaccionando entre sí.*
- Fig 76. *Gráfico esfuerzo – deformación.*
- Fig 77. *Alerón flexible.*
- Fig 78. *Comparativa de flexión entre el McLaren y el Red Bull de 2010.*
- Fig 79. *Dimensiones del alerón delantero de F1 2017.*
- Fig 80. *Dimensionamiento inicial en Catia.*
- Fig 81. *Plano principal del alerón en Catia.*
- Fig 82. *Plano principal y dimensiones en Catia.*
- Fig 83. *Perfiles del alerón de F1 en Catia.*
- Fig 84. *Parte izquierda del alerón delantero en Catia.*
- Fig 85. *Diseño del alerón delantero de F1.*
- Fig 86. *Test de flexión de 1000N (arriba) y de 60N (abajo).*
- Fig 87. *Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de carbono.*
- Fig 88. *Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de carbono.*
- Fig 89. *Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de vidrio.*
- Fig 90. *Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de vidrio.*
- Fig 91. *Test de flexión de 1000N sobre el alerón de aluminio.*
- Fig 92. *Test de flexión de 60N sobre el alerón de aluminio.*
- Fig 93. *Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de carbono modificado.*
- Fig 94. *Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de carbono modificado.*
- Fig 95. *Comportamiento del alerón de fibra de carbono modificado ante el test de flexión de 1000N.*
- Fig 96. *Comportamiento del alerón de F1 de fibra de carbono modificado ante el test de flexión de 60N.*
- Fig 97. *Diseño final del alerón delantero de F1 en Catia.*

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Coefficientes de resistencia.*

Tabla 2. *Propiedades mecánicas de los materiales.*

Tabla 3. *Masa total de los alerones según el material.*

Tabla 4. *Valores del desplazamiento máximo en los test de flexión.*

Tabla 5. *Masa total del alerón según el material.*

Tabla 6. *Valores del desplazamiento máximo en los test de flexión.*



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 *Antecedentes y justificación del TFM*

La Fórmula 1 es la competición internacional de automovilismo más popular y prestigiosa del mundo. Dentro de ella, la aerodinámica se ha convertido en una parte esencial, donde cada equipo invierte grandes cantidades de dinero para su investigación y desarrollo, ya que desempeña un papel fundamental en la configuración general del vehículo. La parte de ingeniería aerodinámica que se encarga del diseño busca dos objetivos principales: crear carga aerodinámica para mejorar la adherencia y minimizar la resistencia aerodinámica.

Debido a esto, cada temporada se diseñan nuevos alerones con nuevas mejoras que permiten optimizar las fuerzas generadas y el flujo de aire a través del vehículo. El alerón delantero es un componente fundamental para el correcto funcionamiento aerodinámico global del vehículo, ya que es el primer elemento que entra en contacto con el flujo de aire. En los primeros monoplazas de Fórmula 1, estas características aerodinámicas no tenían demasiada importancia, pero en la actualidad se realizan trabajos de elevada precisión mediante cálculos y experimentos en túneles de viento para adaptar con precisión las alas y los deflectores de viento hasta el último milímetro.

## 1.2 *Objetivos*

El objetivo principal del proyecto es realizar un diseño en 3D (mediante superficies en Catia) de un alerón de Fórmula 1 atendiendo a las regulaciones del 2017. Para realizar un diseño correcto se seguirán ciertos puntos:

- Estudio de la configuración aerodinámica global de un Formula 1 y sus distintos componentes.
- Análisis de los elementos utilizados actualmente.
- Seguimiento de la normativa de dimensiones y test de flexión establecidos por la FIA.
- Creación del modelo 3D respetando el diseño de los alerones actuales para favorecer la aerodinámica deseada.
- Análisis de materiales.
- Simulación de cargas sobre el alerón para la realización de los test de flexión.

## 1.3 *Alcance y desarrollo del TFM*

La memoria del Trabajo Fin de Máster está estructurada en siete capítulos principales en los cuales se tratarán distintos temas para alcanzar el objetivo propuesto. El primer capítulo es la introducción, en la cual se incluirá la justificación y los objetivos que se pretenden conseguir mediante la realización del proyecto. El segundo capítulo desarrolla el estado del arte, en el que aparece una breve historia de la Fórmula 1 y su evolución.

En el tercer capítulo se explican las principales teorías aerodinámicas y los elementos aerodinámicos de un vehículo de Fórmula 1.

En el cuarto capítulo se realiza un estudio del alerón delantero, analizando sus funciones, los elementos principales y la variación del ángulo de ataque. En el siguiente capítulo se muestran los principales materiales utilizados para la fabricación de los alerones actuales, además de un análisis de la fibra de carbono y de la flexibilidad de los alerones.

En el sexto capítulo se presenta el diseño 3D del alerón, así como las distintas simulaciones realizadas con diferentes materiales.

Finalmente, en el séptimo capítulo se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras realizar el proyecto y se presentan posibles líneas de trabajos futuros.

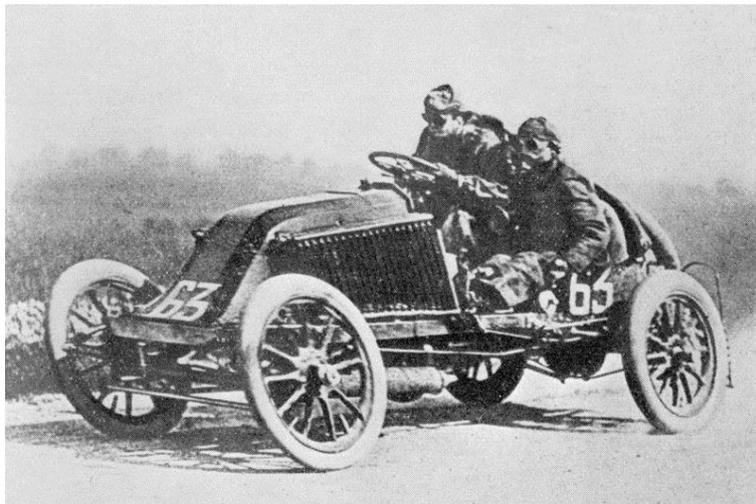


## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Antecedentes de la Fórmula 1

Las carreras Grand Prix tienen origen en las carreras de automóviles organizadas en Francia en 1894. Estas carreras evolucionaron de forma rápida desde carreras por caminos de un pueblo a otro a pruebas de resistencia para los vehículos y los pilotos. La innovación hizo posible superar los 160 km/h, pero al ser carreras por caminos abiertos eran frecuentes los accidentes tanto de pilotos como de espectadores [4].

#### 2.1.1 Las primeras carreras de la historia



*Fig 1. Marcel Renault durante la carrera Paris-Madrid [Hulton Archive]*

James Gordon Bennett Jr., propietario de los periódicos New York Herald y el Herald Tribune, de París, creó en 1900 la Copa Gordon Bennett en Europa, una carrera anual que atrajo competidores de todo el mundo y en la que cada país podía inscribir hasta tres automóviles. Este evento fue trascendental en el mundo de las carreras.

Siguiendo el acto de Bennett, el millonario William Kissam Vanderbilt II lanzó la Copa Vanderbilt en Long Island, Estados Unidos, en 1904.

Influenciado por estas competiciones, Louis Chevrolet, un suizo que trabajaba para un constructor francés, decidió mudarse a Estados Unidos. Desde 1901 se convirtió en la figura principal de las carreras del país americano y fue el diseñador de los vehículos de General Motors que llevaban su nombre.

#### 2.1.2 El primer Gran Premio

En 1906, la primera y única carrera que llevaba el nombre de Gran Premio era organizada por el Club del Automóvil de Francia (CAF) y se corría durante dos días en el mes de junio. El circuito estaba localizado en Le Mans y tenía una longitud total por vuelta de 105 kilómetros. Los participantes tenían que dar seis vueltas cada día (los pilotos necesitaban cerca de una hora para completar una vuelta al circuito). Participaron 32 pilotos representando a 12 fabricantes distintos de automóviles. El húngaro Ferenc Szisz (1873–1944) ganó esta carrera (1260 km) con Renault.

En esta época, cada país organizaba sus propias carreras sin un campeonato que las relacionara entre sí. Las reglas variaban dependiendo del país, pero siempre se regulaban en base al peso máximo del

automóvil, debido a la necesidad de limitar la potencia (los motores de 10 o 15 litros eran bastante comunes y, normalmente, el máximo de cilindros era de 4, llegando a generar una potencia de 50 CV).



Fig 2. Ferenc Szisz ganó el 1º Gran Premio de la historia. [National Motor Museum]

Todos los vehículos contaban con un mecánico a bordo. No estaba permitido reparar o trabajar en el coche a excepción de éste y del propio piloto. Un factor clave para el triunfo de Renault fue el uso de ruedas desmontables desarrolladas por Michelin, las cuales permitían el cambio de neumáticos sin necesidad de desmontar la goma y la cámara de la rueda, es decir, se sustituía el conjunto completo.

### 2.1.3 Desarrollo de circuitos

La mayoría de las carreras se corrían en circuitos que eran caminos públicos temporalmente cerrados, no en pistas construidas específicamente para competir. Este fue el origen del Gran Premio de Le Mans en 1906, así como de la Targa Fiorio (150 km), el circuito alemán Kaiserpreis (de 120 km) y el circuito francés Dieppe (de 77 km), utilizados en los grandes premios de 1907.

Las excepciones de circuitos construidos específicamente para competir fueron el de Brooklands, Inglaterra, terminado en 1907, el Indianapolis Motor Speedway, usado por primera vez en 1909, y el Autodromo Nazionale Monza, Italia, abierto en 1922.



Fig 3. La AIACR reguló el tamaño del motor y el peso. [GP Library]

En 1922, Italia se convirtió en el segundo país, después de Francia, en acoger una carrera usando el nombre de 'Grand Prix', en Monza. Rápidamente se extendió por Bélgica y España en 1924, y más

tarde se amplió por otros países. Sin embargo, aún no se trataba de un campeonato formal, sino de una variada colección de carreras que se celebraban bajo reglas diferentes.

Entre 1927 y 1934, el número de carreras consideradas 'Grand Prix' aumentó, pasando de cinco pruebas en 1927 a dieciocho en 1934.

Antes de la 1ª Guerra Mundial, distintos Grandes Premios empezaron a compartir algunas reglas, basadas principalmente en los tamaños de los motores y su peso.

En 1924 se formó la Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus (AIACR), cuya misión era regular los Grandes Premios. Sin embargo, estas medidas fueron abandonadas en 1928, en una era conocida como 'Fórmula Libre', cuando las organizaciones decidieron correr sin prácticamente ninguna limitación.

#### 2.1.4 La 2ª Guerra Mundial



Fig 4. La famosa curva antes del casino de Montecarlo. [Getty Images]

El primer Campeonato Mundial se llevó a cabo en 1925. Participaron solo constructores y constaba de cuatro carreras (500 Millas de Indianápolis y los Grandes Premios de Europa, Francia e Italia).

Diez años más tarde, y gracias al acuerdo de varias federaciones, se creó el Campeonato de Europa de Pilotos, disputado con carácter anual hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial.

El GP de Mónaco de 1933 fue la primera vez en la historia del deporte en que el orden de inicio se decidió a través de tiempos de clasificación.

Los vehículos que competían se pintaban con sus colores nacionales, aunque en 1934, los alemanes dejaron de pintar sus automóviles (Auto Union y Mercedes-Benz), en un esfuerzo para reducir el peso del coche. Este color metálico hizo que los vehículos alemanes fueran bautizados como las 'flechas plateadas'.

En los años 30, los alemanes estimularon a Mercedes y a la Auto Union. El gobierno participó en la financiación de los dos fabricantes y, durante el periodo de 1934 a 1939, los dos equipos ganaron todo excepto tres carreras.

## 2.1.5 La creación de la Fórmula 1

Inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial solo hubo 4 carreras con categoría de Gran Premio. Las reglas para el Mundial ya se habían establecido y en 1947, la antigua AIACR se reorganizó pasándose a llamar la Federación Internacional de Automovilismo (FIA).

Al final de la temporada de 1949 anunció que para 1950 unirían varios Grandes Premios para crear el Campeonato del Mundo de Fórmula 1 de Pilotos. Se estableció un sistema de puntuación y acordaron un total de siete carreras. La primera carrera del Mundial se disputó el 13 de mayo en el circuito de Silverstone (Reino Unido).

Los italianos fueron los protagonistas en estas primeras carreras del Campeonato del Mundo, tanto las marcas como los pilotos. El primer campeón del mundo fue Giuseppe Farina, al volante de un Alfa Romeo. Ferrari apareció en la segunda carrera, en Mónaco, y tiene la distinción de ser el único fabricante que ha competido a lo largo de toda la historia de este deporte [6].

## 2.2 Evolución de los vehículos de Fórmula 1



Fig 5. Evolución de la Fórmula 1. [GP Library]

### 2.2.1 Los primeros coches de Fórmula 1

En 1950, como respuesta al Campeonato Mundial de Motociclismo iniciado en 1949, la Federación Internacional de Automovilismo (FIA) organizó el primer Campeonato Mundial de Pilotos oficial usando las reglas de la F1 diseñadas tras la guerra. Estas regulaciones exigían el uso de motores atmosféricos de 4.5 litros o supercargados de 1.5 litros. La organización del campeonato, que incorporaba los cinco "mayores" Grandes Premios de Europa, fue una mera formalización de lo que ya se corría en años previos. Los equipos italianos Alfa Romeo, Ferrari, y Maserati dominaron los primeros años.

La sencillez y la pureza de las líneas eran las características principales de los monoplazas. La disposición delantera del motor y el puesto de conducción retrasado, prácticamente junto al eje trasero, completaban las señas de identidad de aquellos primeros vehículos.

Aquel 1950 estuvo dominado por Nino Farina y su Alfa Romeo 158 (Alfetta), con un motor turboalimentado con capacidad de 1,5 litros y 400 caballos. Sin embargo, a finales de 1951 Alfa encontró un fuerte rival en los Ferrari, con motores aspirados de 4.5 litros.



Fig 6. Alfa Romeo 158. [GP Library]

Considerando el aumento de costes y la ausencia de competidores a los Ferrari, la FIA decidió que las siguientes dos temporadas del campeonato se compitieran utilizando motores de 2 litros de la Fórmula 2. Esta medida consolidó el dominio italiano con los 550s del equipo de Enzo Ferrari, proporcionando a Alberto Ascari sus dos campeonatos en 1952 y 1953. Pero no por ello cambió el diseño básico.

En 1954 el campeonato volvió a la reglamentación de F1. Los motores atmosféricos de 2.5 litros fueron permitidos por nuevas regulaciones. Con este cambio finalizó el dominio italiano, pero esto no incrementó la competencia, sino que permitió el regreso triunfante de las Flechas Plateadas de Mercedes al deporte que habían dominado en los años 1930. Los vehículos de Mercedes innovaron con válvulas desmodrómicas, inyección de combustible, nuevas aleaciones, carrocería aerodinámica y otras características avanzadas, los cuales arrasaron las siguientes dos temporadas con Fangio, ganando todas las carreras menos dos. Sin embargo, a finales de 1955 Mercedes desapareció tan rápidamente como llegó, retirándose de las competencias automotrices los siguientes treinta años debido a un grave accidente en las 24 horas de Le Mans.

En 1954, Mercedes presentó el W196 con una versión con neumáticos con carenado, aunque se mantuvo poco tiempo en las pistas.



Fig 7. Mercedes W196. [GP Library]

En 1958 ocurrió un acontecimiento importante para la F1, cuando Stirling Moss ganó el Gran Premio de Argentina pilotando un Cooper con motor trasero inscrito por el equipo privado de Rob Walker y propulsado por un Coventry Climax de 2 litros y 4 cilindros en línea. Esta fue la primera victoria en F1 de un vehículo con motor trasero. Cuando desarrollaron el nuevo motor Coventry Climax de 2.5 litros, los Coopers iniciaron su dominio de tres años en la F1. Los fabricantes Lotus y BRM también apostaron por el cambio hacia motores traseros. Esta evolución fue un cambio trascendente que se sigue manteniendo en la F1.



Fig 8. Fórmula 1 con motor trasero. [GP Library]

En los años 60, el frontal de los vehículos pasó a ser más estilizado y menos voluminoso que en la década anterior (la estructura frontal es considerablemente más plana).

Otro de los grandes avances fue la creación del chasis monocasco de aluminio en 1962 (Lotus 25 de Jim Clark).



Fig 9. Lotus 25 de chasis monocasco de aluminio. [GP Library]

En 1968 llega la gran revolución de la F1, cuando en el GP de Mónaco se incorporaron los primeros alerones en los vehículos de F1 (Lotus 49B).



Fig 10. Vehículo de F1 con los primeros alerones. [GP Library]

Con la idea de Colin Chapman nacieron los elementos aerodinámicos empleados para mejorar el rendimiento. Con estos *avances*, Lotus impresionó al resto de equipos, los cuales copiaron la idea e iniciaron una carrera en el mundo de la aerodinámica y los alerones.

En 1969 se crean vehículos de diferente aspecto en un intento por innovar, como el Lotus de Graham Hill con doble alerón.



Fig 11. Lotus con doble alerón. [GP Library]

En la temporada de 1970, la FIA intervino por razones de seguridad en la regulación de los alerones, adaptándose normas relacionadas con el tamaño y la colocación de estos elementos en los coches.

Posteriormente, Lotus crea un nuevo avance situando los elementos de refrigeración en la parte anterior y en los laterales del vehículo, estableciendo un nuevo patrón de diseño.

A mediados de la década aparecieron las tomas de aire situadas detrás del piloto. Su tamaño desproporcionado hizo que poco después cayeran en el olvido.



Fig 12. Elementos de refrigeración en la parte anterior y en los laterales (izq.) y toma de aire detrás del piloto (drch.). [GP Library]

No todos los diseños innovadores fueron siempre bien recibidos en la Fórmula 1. Este es el caso del Tyrrell P34 de seis ruedas, el cual fue exitoso en la pista e incluso ganó con un doblete en Suecia, pero el concepto no se consolidó.



Fig 13. Tyrrell P34. [GP Library]

En 1978, el legendario diseñador Colin Chapman juega por primera vez con el efecto suelo con el diseño de Lotus, permitiendo incrementar la adherencia al suelo y con ello, la velocidad en las curvas, haciendo disminuir los tiempos por vuelta. Al mismo tiempo, Renault presentó su motor turbo y aunque en principio resultó ser poco estable, permitió otro avance en la evolución de la F1.



Fig 14. Lotus con el diseño del efecto suelo (arriba) y Renault con motor turbo (abajo). [GP Library]

El diseño del coche típico de Fórmula 1 en los años 70 era con un gran alerón delantero a modo faldón, cajas laterales bajas y un gran alerón trasero con neumáticos traseros enormes.



Fig 15. Fórmula 1 típico de los años 70. [GP Library]

En 1981, McLaren se convierte en el primer equipo que crea un chasis monocasco de fibra de carbono. En los años siguientes pasó a ser el estándar de la Fórmula 1 y sigue siéndolo.



Fig 16. Chasis monocasco McLaren de fibra de carbono. [GP Library]

A principios de los 80, el coche de Fórmula 1 sin alerón delantero hace una breve reaparición. A mediados de la década de los 80, se construyó un monoplaza con una cola alargada, capó plano, cajas laterales largas y una parte delantera relativamente corta. Los alerones delantero y trasero eran más refinados, de pequeña escala y detrás de la cabina del piloto sólo aparecía una pequeña barra antivuelco.



Fig 17. Fórmula 1 sin alerón delantero (izq.) y Fórmula 1 con parte trasera alargada (drch.). [GP Library]

En 1988, el McLaren MP4/4 de Ayrton Senna fue el coche dominante, uno de los mejores coches de la historia, y el último Fórmula 1 que ganaba con motor turbo hasta la era actual, ya que en la temporada de 1989, los motores turbo se prohibieron. A cambio, se implantaron los motores atmosféricos de 3.5 litros. La toma de aire del motor se colocaba tras el cockpit, justo encima de la cabeza del piloto.



Fig 18. McLaren MP4/4 (arriba) y Fórmula 1 con la toma de aire detrás del cockpit (abajo). [GP Library]

En los años 90 se introdujo un nuevo diseño en la estructura delantera de los monoplazas, utilizando un morro más elevado y a mayor distancia del asfalto.



Fig 19. Estructura delantera más elevada (diseño de los años 90). [GP Library]

En 1993 las ayudas electrónicas comienzan a tomar un papel desproporcionado en los coches, y empiezan a usar deflectores de viento laterales entre el eje delantero y los marcos laterales, como en el McLaren MP4 / 8 de Michael Andretti.



Fig 20. Deflector de viento lateral. [GP Library]

Un año más tarde, la FIA tomó la decisión de prohibir todos los sistemas electrónicos, convirtiéndolos en máquinas difíciles de pilotar y más impredecibles. En esta época se pueden recordar las trágicas muertes de Roland Ratzenberger y de Ayrton Senna y el terrible accidente de Rubens Barrichelo en el GP de San Marino 1994 para comprender la trascendencia de la decisión adoptada.



Fig 21. F1 tras la prohibición de los sistemas electrónicos (arriba) y accidente de Barrichelo en GP San Marino (abajo). [GP Library]

Como respuesta a estos accidentes, se amplió el espacio de los cockpits y sus paredes circundantes se elevaron. De esta forma se ofrecía una mayor protección debido a la menor exposición del cuerpo del corredor ante posibles accidentes.



Fig 22. F1 con más elementos de seguridad. [GP Library]

En la temporada de 1998, los coches de Fórmula 1 pasan a ser más estrechos y para reducir la velocidad en curva, los neumáticos dejan de ser lisos: los delanteros tienen tres ranuras y los traseros cuatro. A partir del año siguiente, se empezaron a utilizar neumáticos con cuatro ranuras uniformes, tanto los delanteros como traseros.



Fig 23. Neumáticos con ranuras. [GP Library]

A principios de la década del 2000, la aerodinámica se vuelve cada vez más compleja y los coches presentan aletas adicionales en los laterales.

En 2006, la Fórmula 1 pasa de motores V10 a motores V8 3.0 de 2.4 litros. En esta época, los ingenieros utilizan cada centímetro del automóvil para generar más carga aerodinámica (aletas, alerón trasero y delantero curvado).

En la última temporada antes del cambio de reglas aerodinámicas aparecen varios alerones diferentes en los coches Fórmula 1, eran más resistentes e incluso alguno tenía una especie de cuernos.



Fig 24. F1 con diferentes alerones antes del cambio de reglamento. [GP Library]

Para el nuevo reglamento de 2009, los coches pierden varios apéndices adicionales y un estilo más minimalista. El coche tiene un alerón delantero que ocupa la anchura del vehículo y el trasero se reduce. Su vuelve a los neumáticos lisos y el 'KERS' en algunos equipos.



Fig 25. F1 después del reglamento de 2009. [GP Library]

Red Bull presentó un nuevo elemento aerodinámico situado en la zona del capó motor, conocido popularmente como aleta de tiburón o aleta dorsal. Pronto otros equipos como Ferrari se sumaron a la idea de Milton Keynes.



Fig 26. Aleta de tiburón. [GP Library]

Los diseños de los coches se vieron influidos por la presencia de los F-Duct, conductos destinados a redirigir el aire desde el alerón delantero hasta la parte trasera para sacar ventaja aerodinámica. El piloto podía activar el conducto F desde el habitáculo cubriendo un orificio con el guante o la rodilla o simplemente dejarlo abierto.

En 2011 llegó el DRS (Drag Reduction System), una innovación que cambió la Fórmula 1. Destinado a facilitar los adelantamientos, los pilotos pueden activarlo durante unos segundos por vuelta (en zonas previamente establecidas y cuando se está a menos de un segundo del coche de delante): el alerón trasero se abre permitiendo una mayor velocidad.



Fig 27. Red Bull atacando con el alerón trasero abierto y Ferrari con el alerón en posición neutra. [GP Library]

En la temporada de 2012, apareció un diseño de morro escalonado debido a una nueva normativa de la parte delantera.



Fig 28. Formula 1 con parte delantera escalonada. [GP Library]

En 2013, por primera vez en la Fórmula 1, todos los equipos utilizaron el sistema de recuperación de energía cinética (KERS), que debutó en algunos coches en 2009, se prohibió en 2010 y volvió en 2011. Es un componente importante, aunque es invisible a simple vista (desde el exterior no se puede ver).

Un año más tarde, el nuevo formato con motores híbridos de 1.6 litros hizo su debut en la Fórmula 1. Al mismo tiempo, hay nuevas formas para la parte delantera debido al reglamento y Lotus utilizó un diseño completamente opuesto que también llamó la atención.



Fig 29. Fórmula 1 con motor híbrido 1.6 litros (arriba) y Lotus con nuevo diseño delantero (abajo). [GP Library]

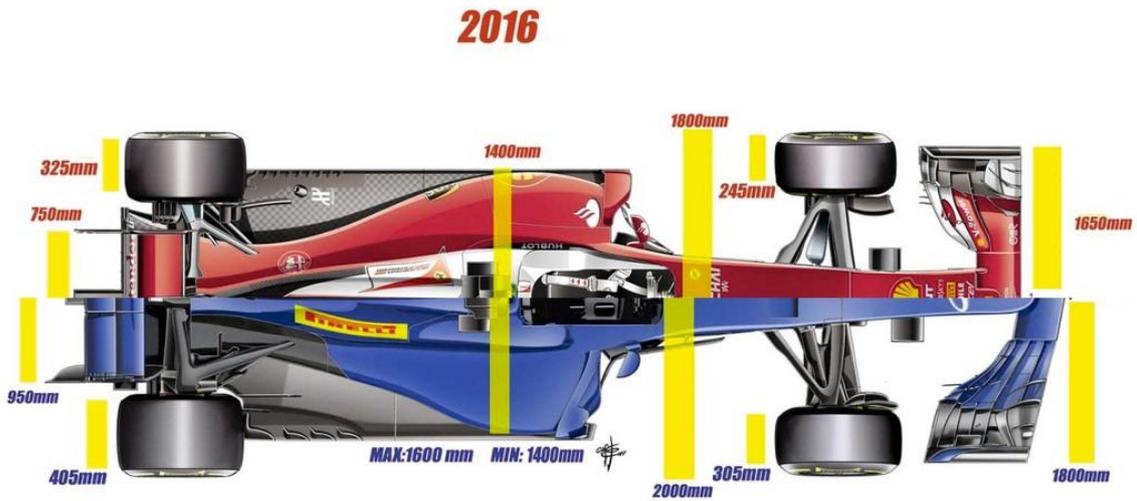
Mercedes y otros equipos demostraron que un coche moderno también puede ser atractivo y que las regulaciones no tienen por qué ser un obstáculo a la hora de fabricar un monoplaza visualmente estético y rápido.



Fig 30. Diseño Mercedes. [GP Library]

La Fórmula 1 cambia constantemente de normativa y los vehículos volverán a ser diferentes visualmente. En un futuro, se esperan monoplazas más anchos, un alerón trasero más grande e inclinado hacia atrás y neumáticos de mayor tamaño. El formato de los alerones da al coche aspecto de flecha, y se espera que sean cinco segundos por vuelta más rápidos que los de 2015.

De hecho, estas son las diferencias entre los nuevos coches y sus predecesores.



**2017**

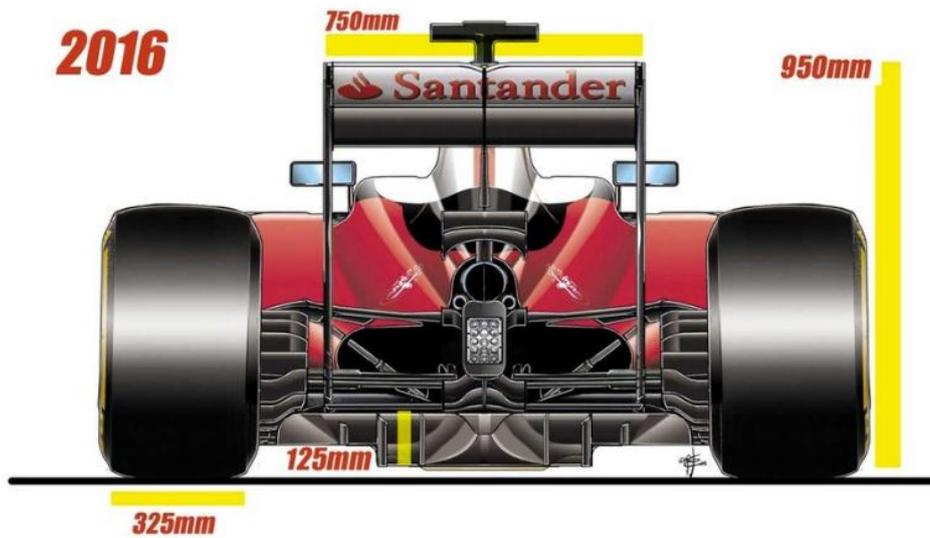


Fig 31. Diferencias 2016 y 2017. [GP Library]

## 3 AERODINÁMICA

### 3.1 Introducción a la aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre cuerpos sólidos y el aire cuando existe movimiento relativo entre ellos.

Los objetivos principales de la aerodinámica son básicamente dos:

- La aerodinámica se encarga de estimar las fuerzas, los momentos y la transferencia de calor que provoca este movimiento relativo a través de los cuerpos (aerodinámica externa).
- La aerodinámica determina las propiedades del flujo a través de conductos (aerodinámica interna).

Para determinar las cargas aerodinámicas o las propiedades del flujo existen tres métodos: analítico, experimental y numérico.

Los fluidos se definen como el medio que ante esfuerzos cortantes no es capaz de encontrar una configuración de equilibrio y comienza a moverse o a fluir.

El movimiento de un fluido se define como flujo y la forma de describirlo es estudiando el valor que toman ciertas variables fluidas representativas (presión, temperatura, velocidad y densidad). El movimiento de un fluido puede ser muy complejo y su descripción se puede realizar empleando la formulación lagrangiana o euleriana. En la formulación lagrangiana se pretende medir las variables de interés siguiendo a las partículas materiales en su movimiento. En cambio en la formulación euleriana se estudian las variables fijándose en un punto fijo del espacio, independientemente de las partículas fluidas [5].

Los flujos se pueden clasificar en diferentes categorías. Atendiendo a la variación de la densidad que experimenta un flujo en su movimiento:

- **Flujo compresible.** Un flujo es compresible cuando el fluido experimenta variaciones apreciables de densidad a lo largo de su movimiento, y por lo tanto esta propiedad no puede considerarse constante. Si el fluido es aire, cuando el número de Mach del flujo es  $M > 0.3$ , el flujo de aire es compresible, ya que aparecen variaciones de densidad que deben ser consideradas.
- **Flujo incompresible.** Aquel en el que el fluido no experimenta variaciones importantes de densidad, y por tanto se puede suponer constante a lo largo de su movimiento. Si el fluido es aire, cuando el número de Mach del flujo es  $M < 0.3$ , las variaciones de densidad con respecto a la densidad en reposo son inferiores al 5%, por lo tanto, el flujo de aire puede considerarse incompresible ( $\rho = \text{cte}$ ).

Según el número de Mach.

- **Flujo subsónico ( $M < 1$ ).** El fluido se mueve con una velocidad inferior a la del sonido.
- **Flujo sónico ( $M = 1$ ).** El fluido se mueve a la velocidad del sonido.
- **Flujo supersónico ( $M > 1$ ).** El fluido se mueve a mayor velocidad que la velocidad del sonido.

El número de Mach es un número adimensional que indica cómo es la velocidad real de un flujo respecto a la velocidad del sonido en ese mismo flujo. Este número se define como:

$$M = \frac{\text{velocidad del flujo}}{\text{velocidad del sonido}} \quad (1)$$

También se puede clasificar en viscosos o no viscosos:

- **No viscoso.** Es un flujo ideal (no experimenta fricción interna entre las partículas del fluido).
- **Viscoso.** Es un flujo no ideal (se opone a esfuerzos tangenciales).

### 3.1.1 Teorema de Bernoulli

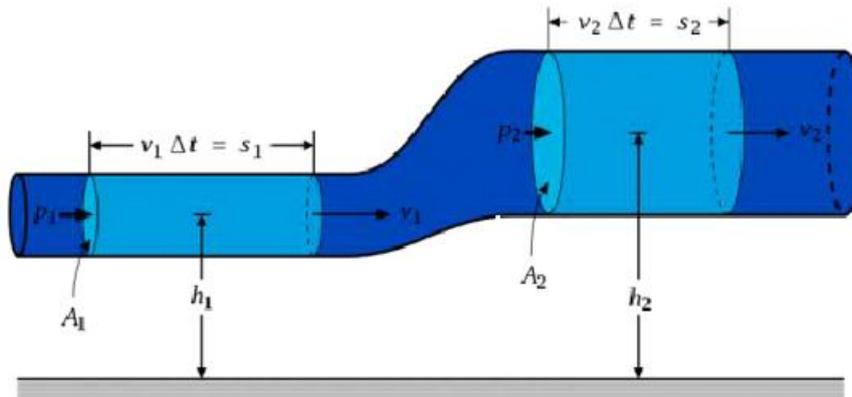


Fig 32. Diagrama del Teorema de Bernoulli. [8]

Existen tres tipos de energía: energía potencial (por cota o altura), energía cinética (por velocidad) y la de presión. Como la energía se conserva, la cantidad total de energía permanece constante. Esta ecuación se denomina ecuación de Bernoulli.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte \quad (2)$$

Donde:

$V$  = velocidad del fluido en la sección considerada (m/s).

$g$  = aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>).

$z$  = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia (m).

$P$  = presión a lo largo de la línea de corriente (Pa).

$\rho$  = densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

De esta forma, si la presión aumenta, la velocidad ha de disminuir.

Para aplicar la ecuación se deben realizar las siguientes consideraciones:

- Flujo ideal (viscosidad despreciable).
- Caudal constante.
- Flujo incompresible (densidad constante).
- Flujo estacionario.

### 3.1.2 Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad describe el comportamiento de un flujo dentro de un conducto. Si dentro de este no hay ninguna fuente ni sumidero, la cantidad de masa de fluido por unidad de tiempo que entra en el tubo de corriente por la sección de entrada, es igual a la masa por unidad de tiempo que sale del tubo por la sección de salida.

$$\rho u A = cte \quad (3)$$

Donde:

$\rho$ : densidad (kg/m<sup>3</sup>)  
 $u$ : velocidad (m/s)  
 $A$ : área (m<sup>2</sup>)

En el caso particular de flujos incompresibles la ecuación de conservación de la masa se simplifica, ya que en un flujo incompresible se supone la densidad constante. Esta ecuación queda:

$$u A = cte \quad (4)$$

Se define el caudal o gasto volumétrico ( $Q$ ) como el producto de la velocidad media ( $u$ ) por el área ( $A$ ).

La conservación del caudal para un flujo incompresible implica que en un conducto, cuando la sección disminuye en el sentido del movimiento, el fluido debe ir aumentando la velocidad para conservar la masa por unidad de tiempo.

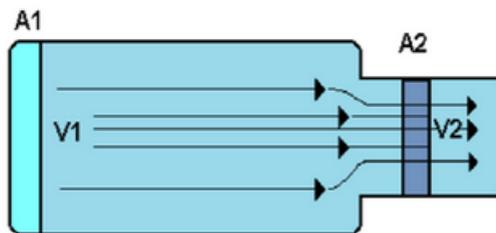


Fig 33. Conducto Ecuación de continuidad. [8]

### 3.1.3 Efecto Venturi

El efecto Venturi se explica mediante los dos principios anteriores: el teorema de Bernoulli y la ecuación de continuidad. Cuando un fluido pasa por el interior de un conducto, al pasar por una sección menor, la velocidad aumenta y la presión disminuye.

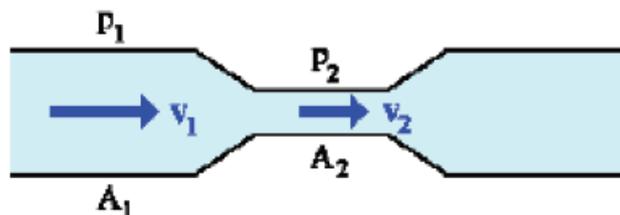


Fig 34. Esquema del efecto Venturi. [8]

Si se produce un cambio de sección y  $A_1 > A_2$ :

- $V_1 < V_2$
- $P_1 > P_2$

### 3.1.4 Flujos viscosos

Las fuerzas viscosas o de fricción en la mayor parte del campo fluido, sin embargo juegan un papel importante en las cercanías de las superficies sólidas. La viscosidad tiene una importancia fundamental en la configuración del flujo de la zona cercana a la pared y es la responsable de fenómenos como la generación de sustentación, la existencia de resistencia de fricción y el desprendimiento de la capa límite.

La importancia de la viscosidad en el movimiento de los fluidos queda visible en la paradoja de D'Alembert, la cual expresa que en un flujo ideal (flujo en el que los esfuerzos viscosos son despreciables) la resistencia de un cuerpo es nula, a pesar de que la experiencia demuestra que no es así. Al considerar el flujo ideal alrededor de un cilindro, se puede determinar que las líneas de corriente adquieren una configuración simétrica, tanto respecto al eje horizontal como al vertical. Por tanto, la distribución de presiones que aparece como consecuencia del campo de velocidades también presenta dichas simetrías. La integración de esta distribución de presiones es la resultante de las fuerzas aerodinámicas, y dadas las simetrías que presenta, se concluye que esta resultante es nula.

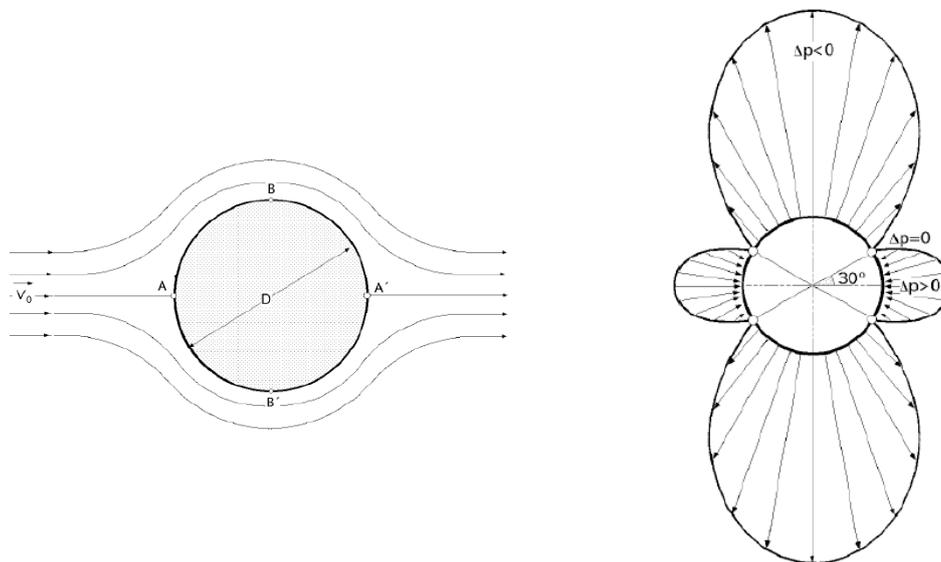


Fig 35. Diagrama de flujo ideal. [5]

Este resultado teórico contradice la experiencia real, ya que un cuerpo que se mueve en el seno de un fluido experimenta una fuerza que se opone al movimiento (resistencia aerodinámica). Cuando se considera el esquema de flujo real, que incluye el efecto de los esfuerzos viscosos alrededor de un cilindro, se observa que las líneas de corriente presentan simetría respecto al eje horizontal, mientras que respecto al eje vertical aparece una marcada diferencia entre la zona corriente arriba y la zona corriente abajo del cilindro. Esta falta de simetría respecto al eje vertical hace que la distribución de presiones en la zona trasera sea diferente a la de la zona delantera del cilindro. La resultante aerodinámica, obtenida por la integración de la distribución de presiones, no es cero, y aparece una fuerza de resistencia sobre el cilindro. La forma del flujo real es consecuencia directa de las fuerzas viscosas en la cercanía de la pared, que juegan un papel predominante en la aparición del fenómeno denominado desprendimiento de la capa límite. El flujo corriente abajo del cilindro, donde se extiende la zona de corriente desprendida, es lo que se denomina estela, y en este caso es generada por el desprendimiento de la capa límite.

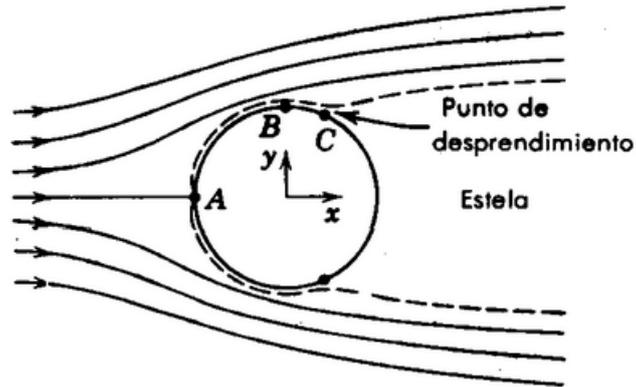


Fig 36. Diagrama de flujo real y desprendimiento. [5]

En el flujo real de un fluido alrededor de una superficie se pueden considerar dos zonas: la capa límite y la zona exterior a dicha capa. La capa límite es la zona cercana a la superficie donde el flujo resulta afectado por las fuerzas de fricción. En esta zona el flujo se decelera desde el valor de la corriente exterior hasta el valor nulo en la superficie. En la frontera exterior de la capa límite, lejos de la superficie, las condiciones de flujo son aproximadamente iguales a las de flujo ideal. El espesor de la capa límite aumenta a medida que el flujo progresa sobre la superficie.

### 3.1.5 Capa límite y desprendimiento

El flujo de un fluido tiene dos formas básicas de desarrollarse:

- Laminar.
- Turbulento.

Lo que define que un flujo se comporte de una u otra forma es el balance entre dos tipos de fuerzas: las viscosas y las convectivas. Cuando en un flujo se introduce una perturbación, las fuerzas viscosas son las responsables de que esta perturbación se amortigüe y no se amplifique, mientras que las fuerzas convectivas tienden a amplificar dicha perturbación. Dependiendo de la importancia relativa de unas fuerzas frente a otras, el flujo tiende a ser turbulento o laminar. En el flujo turbulento, las perturbaciones se amplifican porque las fuerzas viscosas no son lo bastante grandes comparadas con las convectivas, y no son capaces de amortiguar las perturbaciones en el seno del fluido. En cambio, en el movimiento ordenado o flujo laminar, las fuerzas viscosas son lo bastante importantes como para poder amortiguar dichas perturbaciones [8].

La estela y la resistencia aerodinámica son consecuencia de los efectos de la viscosidad. En la interfase entre un sólido y un fluido que se mueven uno respecto a otro, aparece una capa delgada, llamada capa límite, donde los esfuerzos viscosos son importantes. Las partículas fluidas dentro de la capa límite son deceleradas por el efecto de las fuerzas viscosas, es decir, pierden energía cinética. En estas condiciones puede suceder que en algún punto de la superficie del sólido, el flujo llegue a detenerse completamente o incluso se puede invertir el sentido de avance.

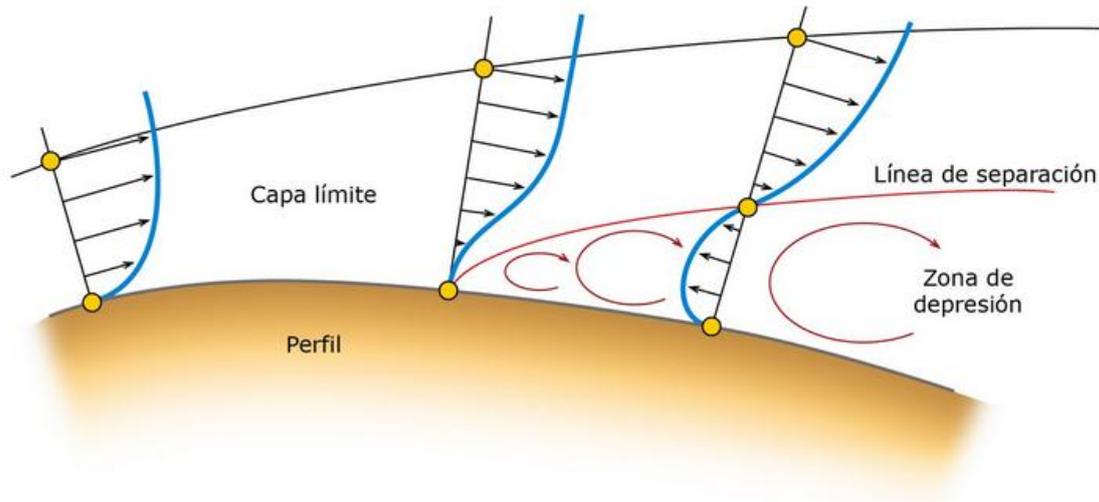


Fig 37. Desprendimiento de la capa límite. [5]

Bajo estas circunstancias la capa límite deja de existir y se separa de la superficie del cuerpo generando una estela. El punto donde sucede esto es el punto de desprendimiento de la capa límite.

En términos generales puede afirmarse que el hecho de que la capa límite se desprenda y el punto donde sucede, dependen de la energía cinética que contenga la capa límite, y cuanto mayor sea esta energía, menos susceptible es de desprenderse.

Las capas límites también pueden ser laminares o turbulentas, y en general en un mismo flujo coexisten los dos tipos de regímenes.



Fig 38. Transición de capa límite laminar a turbulenta. [5]

Las capas límites laminares poseen un flujo ordenado, las líneas de corriente no se mezclan y, por tanto, la mezcla en el fluido es pequeña; además en cada punto el flujo es muy estable y no presenta fluctuaciones. Los espesores de capa límite laminar son menores, en general, en comparación con las capas límites turbulentas.

Las capas límites turbulentas se caracterizan porque las partículas fluidas siguen movimientos poco ordenados e irregulares, y el proceso de mezclado es intenso. El proceso de mezclado de este régimen convierte el flujo en tridimensional.

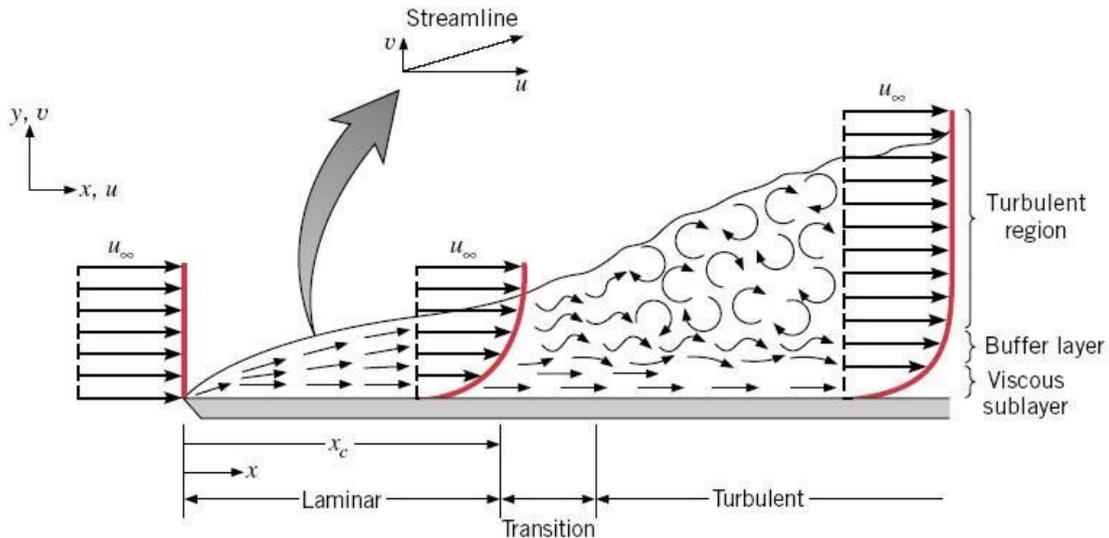


Fig 39. Diagrama de velocidades de la capa límite. [5]

Por sus características, la capa límite laminar contiene menor energía cinética que la turbulenta, y por tanto, en condiciones similares de presión, una capa límite laminar se desprende antes que una turbulenta.

A partir de este razonamiento, se deduce que si la capa límite se desprende en un punto más retrasado, el ancho de la estela será menor, lo que implica una menor resistencia de forma.

En este trabajo se han descrito dos fuentes de resistencia aerodinámica. La primera es de origen viscoso (resistencia de fricción) y es debida a las fuerzas de fricción viscosa que aparecen en la superficie del cuerpo, y para reducirla conviene que la capa límite sea laminar. La segunda tiene su origen en la presión (resistencia de presión o de forma) y es debida a la asimetría de la distribución de presiones que se produce por el desprendimiento de la capa límite; para reducirla es conveniente que la capa límite sea turbulenta.

El desprendimiento de la capa límite provoca que el flujo de aire deje de estar en contacto con los elementos aerodinámicos, los cuales basan su funcionamiento en la forma en que el flujo de aire los rodea, generando además turbulencias.

Sin embargo una capa límite turbulenta proporciona mayor resistencia al desprendimiento de la capa límite, por lo que los vehículos de F1 poseen ciertos elementos aerodinámicos que se encargan de convertir el flujo laminar ya aprovechado en flujo turbulento, para alargar el máximo tiempo posible el desprendimiento de la capa límite.

Por esto es muy importante el estudio de la capa límite en el diseño de un vehículo de competición. La forma de los elementos aerodinámicos debe estar muy bien estudiada para conseguir que la capa límite discorra en régimen laminar y que se desprenda lo más tarde posible para evitar la aparición de turbulencias.

### 3.1.6 Fuerzas

Cuando se somete un perfil aerodinámico a una corriente de fluido, éste obliga al aire a desviarse trazando líneas de corriente. Si se orienta el perfil con respecto a la corriente, de modo que el ángulo de ataque no sea nulo o la distribución de presiones no sea simétrica, aparece una resultante más un momento de origen aerodinámico. Esta fuerza resultante puede expresarse como una componente de sustentación (L) en la dirección perpendicular al flujo, y otra de resistencia (D), en la dirección del movimiento.

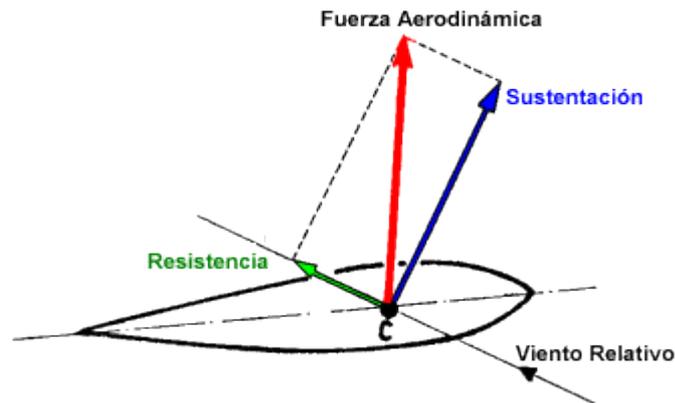


Fig 40. Descomposición de la fuerza aerodinámica. [8]

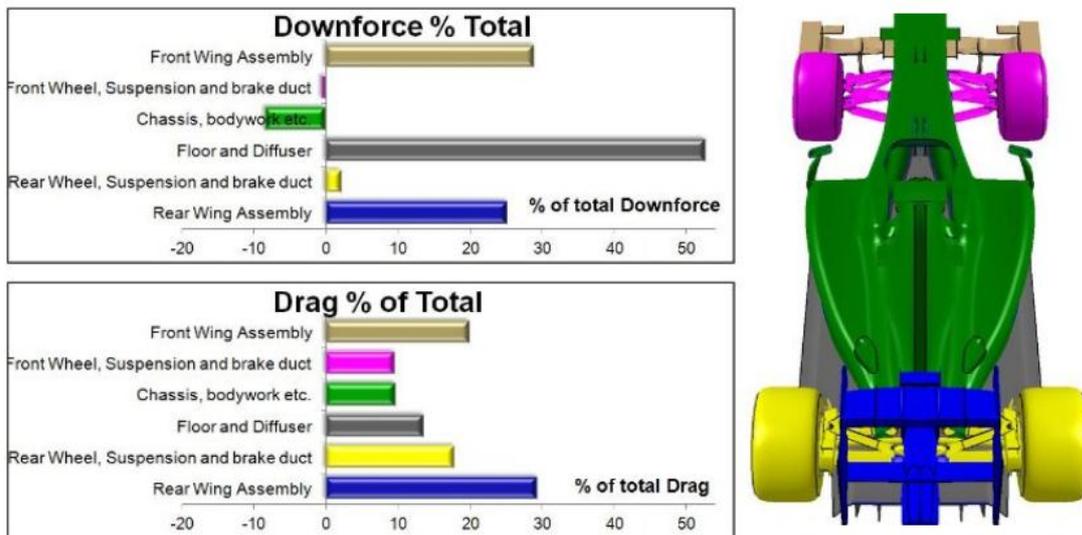


Fig 41. Componentes de la fuerza aerodinámica en un Fórmula 1. [12]

### 3.1.7 Resistencia

La fuerza de resistencia al avance está provocada por la fricción del perfil con el aire. Las partículas de aire en contacto con el cuerpo en movimiento se adhieren a él debido a la viscosidad, y las partículas cercanas son frenadas por éstas, creando así el fenómeno de capa límite. Esto favorece la aparición de la fuerza de resistencia al avance. Esta fuerza también depende de la forma del cuerpo en movimiento, a más sección transversal mayor superficie de contacto con el aire que se adhiere y lo decelera.

La resistencia aerodinámica ( $D$ ) es la fuerza que se opone al avance de un objeto por el aire. El objetivo es conseguir un valor lo más bajo posible, lo que indicaría que existe muy poca resistencia al avance del vehículo por el fluido.

Para dar valor a esta fuerza se define un coeficiente de resistencia al avance  $C_D$  que representa la oposición que sufre un cuerpo a desplazarse en la dirección del movimiento.

Tabla 1. Coeficientes de resistencia. [8]

Forma	Coeficiente de resistencia
Perfil aerodinámico	0.04
Coche deportivo	0.2 – 0.3
Esfera	0.47
Turismo	0.5 – 0.6
Cilindro	0.6 - 1.2
Bicicleta	0.9
Camión	0.8 – 1.0
Fórmula 1	0.7 – 1.1

Se observa que los vehículos de Fórmula 1 tienen un coeficiente bastante elevado; esto es debido a que a menudo para ganar carga aerodinámica ha de aumentar también la resistencia al avance.

Por este motivo este coeficiente no tiene un valor fijo en estos vehículos, ya que en función del circuito en el que se va a competir, es posible modificar ciertos elementos aerodinámicos para perder un poco de carga aerodinámica a cambio de reducir la resistencia al avance. Cuanto más rápido sea el circuito, es decir, con más rectas, menor interesa que sea este coeficiente.

Una vez presentado este concepto, se puede definir la fuerza de resistencia al avance como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D(\alpha) A v^2 \quad (5)$$

Donde:

$\rho$ : es la densidad del fluido, en este caso aire.

$v$ : es la velocidad a la que se desplaza el vehículo.

$A$ : es el área frontal del monoplace.

$C_D$ : es el coeficiente de resistencia y tiene diferentes valores en función del ángulo de ataque.

En la siguiente figura se puede observar como varía el coeficiente de resistencia con el ángulo de ataque del perfil.

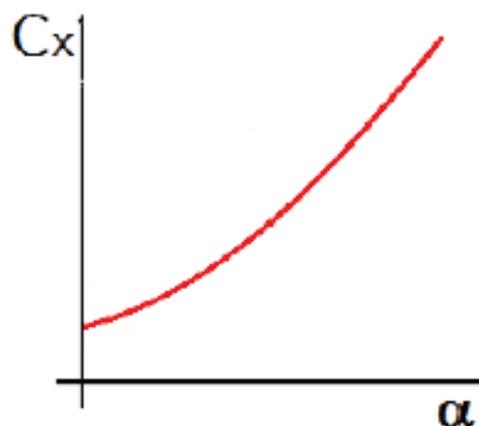


Fig 42. Gráfica del coeficiente de resistencia. [8]

### 3.1.8 Carga aerodinámica

La fuerza de sustentación aparece cuando el aire tiene que recorrer de diferente forma un perfil por la parte superior e inferior. Al ser diferente la trayectoria de la línea de corriente la velocidad a la que la recorre es también distinta, provocando que la presión sea distinta en la parte superior y en la parte inferior del perfil. Esta diferencia de presión provoca la fuerza de sustentación, perpendicular a la velocidad de avance del aire, y que puede tener sentido tanto ascendente como descendente en función de la geometría del perfil.

En el caso de la Fórmula1 esta fuerza se denomina carga aerodinámica y tiene un sentido negativo (hacia el suelo), para que empuje al vehículo hacia el asfalto aumentando así el agarre y permitiendo mayor velocidad en el paso por curvas.

Se define un coeficiente de sustentación, que proporciona una idea aproximada de la facilidad que tiene un cuerpo para provocar este tipo de fuerzas verticales. El valor de este coeficiente depende básicamente del cuerpo estudiado [5].

La ecuación de esta fuerza es:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L(\alpha) A v^2 \quad (6)$$

Donde el área a tener en cuenta será la sección en planta del elemento que recibe esta fuerza. El coeficiente de sustentación depende del ángulo de ataque del perfil.

En la siguiente gráfica se muestra el coeficiente aerodinámico de un perfil en función del ángulo de ataque.

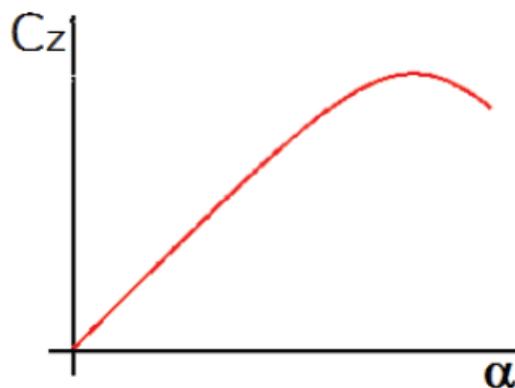


Fig 43. Gráfica del coeficiente aerodinámico. [8]

Este gráfico consta de una primera zona lineal hasta llegar a un punto máximo en el que empieza a descender el  $C_z$ . En la zona donde disminuye el coeficiente de sustentación al seguir aumentando el ángulo de ataque se produce el desprendimiento de la capa límite (el aire no es capaz de seguir el contorno del perfil y se separa de éste, entrando en pérdida).

### 3.1.9 Alerones

Desde que se ha introducido la aerodinámica en la Fórmula 1, se ha intentado conseguir el máximo agarre aerodinámico con la menor resistencia posible. Una de las posibilidades de lograr esto es conduciendo el flujo de aire a lo largo del monoplaza, transformando el flujo turbulento a flujo laminar, mediante deflectores que hacen que el aire pueda ser canalizado normalmente hasta llegar a los componentes aerodinámicos principales, es decir, los generadores de downforce.

Para canalizar un flujo no es suficiente una sola acción o un sólo dispositivo, sino que se necesita de una serie de elementos, que gracias al trabajo en común, logran hacer que el objetivo final se cumpla o se aproxime.

Los principios que permiten volar a una aeronave se pueden aplicar a un F1. La diferencia más importante es la forma en la que se dispone el ala o alerón (en los F1 se coloca invertido, produciendo downforce en vez de sustentación).

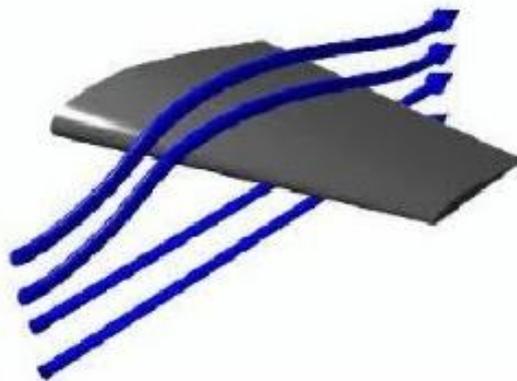


Fig 44. Recorrido del flujo de aire a lo largo del ala de un avión. [7]

El motivo por el que un avión despegar se debe al diseño de las alas. Estas tienen una mayor superficie en la parte superior. Esta mayor superficie superior provoca que el aire que circula por la parte superior aumente su velocidad con respecto al aire de la parte inferior; esto provoca una reducción de la presión en la parte superior, y que por tanto, exista una mayor presión en la parte inferior que impulsa hacia arriba a la aeronave (Fuerza de Bernoulli).

En Fórmula 1 se invierten estos procesos, ya que se busca empujar hacia abajo a los vehículos. Esto se consigue desarrollando una mayor presión en la parte superior de los alerones; por lo tanto, la parte inferior de los alerones será la que tenga una mayor superficie para así reducir la presión.

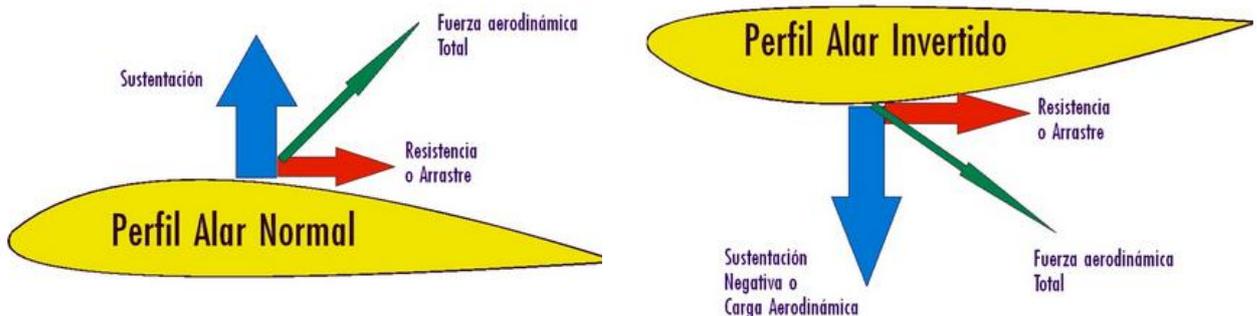


Fig 45. Fuerzas aerodinámicas en una aeronave y en un F1. [7]

Un alerón trasero de un F1 está formado por dos planos que son dos alas invertidas, lo que permite lograr downforce (efecto contrario a la sustentación).

Los alerones son uno de los elementos más importantes al hablar del agarre, ya que son los encargados de generar alrededor del 66% de la fuerza vertical hacia el suelo del vehículo.

Lo normal es que posean secciones de perfil aerodinámico multielemento (similar a los que se despliegan en los aviones en fase de aterrizaje o despegue) optimizados para velocidades pequeñas, ya que las velocidades máximas de los Fórmula 1 son lentas en comparación con las de cualquier vuelo de crucero. En cada extremo lleva superficies transversales que sirven para reducir la resistencia inducida o resistencia de borde de ala. Esta resistencia es una resistencia inevitable, existente por el hecho de la tridimensionalidad, en la que al aire tiende a desviarse por el camino más fácil, es decir, por el lateral del alerón en vez de por dónde debe ir, generando así un torbellino que da resistencia; esta resistencia se puede minimizar con estas superficies o winglets.

## 3.2 Elementos aerodinámicos en un Fórmula 1

### 3.2.1 Alerón delantero

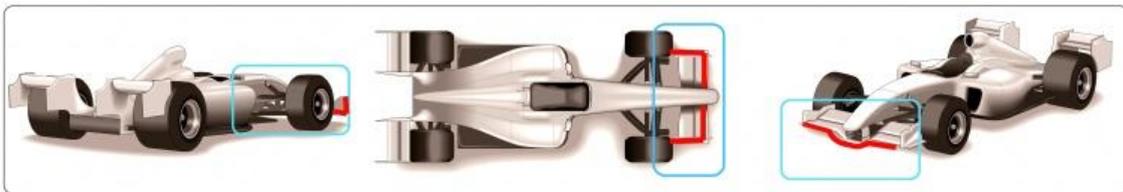


Fig 46. Alerón delantero. [7]

El alerón delantero está formado por diferentes planos, *flaps* y *winglets*. Es el elemento principal a la hora de definir la eficiencia aerodinámica de un monoplaza, ya que gestiona el flujo de aire alrededor del coche. Genera carga aerodinámica en el tren delantero y también debe conseguir que el flujo sea lo más eficiente posible, evitando las mayores turbulencias que genera un monoplaza en los neumáticos y brazos de suspensión [7].

Carga con el 33% de la fuerza hacia abajo total del coche (la mitad del grupo alerón. Otra función que realiza el alerón delantero gracias a su forma, es la de deflectar aire hacia los frenos para mejorar su refrigeración. El conflicto principal en el diseño es buscar una solución de compromiso entre la generación de fuerza vertical y el desvío de aire a otras partes del coche.

Las **funciones** del sistema de alerones delanteros se pueden clasificar en:

- **Generar empuje vertical.**
- **Separar convenientemente el flujo de aire incidente en las ruedas delanteras.**
- **Adecuar el flujo que pasa por debajo del suelo y a los pontones de refrigeración.**
- **Adecuar el flujo al casco del piloto y a la toma de aire del motor.**
- **Sellar el suelo, por métodos aerodinámicos.**

### 3.2.2 Carenado

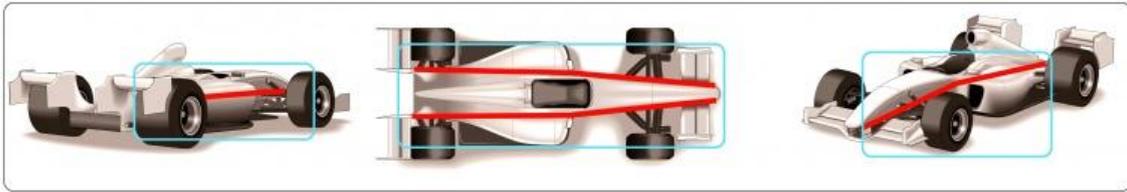


Fig 47. Carenado. [7]

El carenado de un Fórmula 1 está diseñado, para producir el máximo downforce minimizando a su vez la resistencia. Para conseguirlo, la parte superior del coche está diseñada para cortar el aire tan finamente como sea posible, mientras que su parte inferior se diseña para crear una zona de baja presión entre el coche y el asfalto que empuje al vehículo hacia el suelo.

El chasis principal contiene una especie de jaula de seguridad donde se encuentra el puesto de conducción y su función es reducir el impacto recibido por un posible choque frontal. Adicionalmente, el coche debe tener barras reforzadas delante y detrás del piloto, y éste debe ser capaz de entrar y salir del coche retirando el volante. El chasis de un F1, suele estar construido en diferentes materiales, dependiendo de la rigidez, costo y forma necesarias. El material más habitual, usado en un F1, es la fibra de carbono, ya que es un material muy ligero.

El desarrollo del “efecto suelo” empezó en los años setenta cuando los ingenieros empezaron a usar “alas” montadas en los coches para generar downforce en las ruedas traseras. Por razones de seguridad se prohibieron esos alerones y los ingenieros investigaron otras fuentes de downforce. Esto dio lugar a un rediseño del underbody (parte inferior del monoplaça) y se introdujeron los sidepods (pontones) que contenían los radiadores que introducían el aire debajo del coche hacia sus túneles. Dichos túneles se estrechaban en el centro y se ensanchaban hacia la parte posterior del coche. Tal y como el aire se movía hacia los túneles, se creaba un área de baja presión entre el coche y el suelo. Esto producía que el coche fuera succionado hacia el suelo. Al progresar las pruebas con estos nuevos diseños, los ingenieros se observaron que reduciendo el flujo lateral debajo del coche mejoraba aún más el efecto suelo. De esta forma se adjuntaron faldas ajustables (verticalmente) en los sidepods de los coches para reducir el flujo lateral, de nuevo esto resultó en una mejora a nivel aerodinámico pero el organismo regulador de entonces intervino.

Actualmente las regulaciones de la FIA estipulan que los Fórmula 1 deben tener un fondo plano y prohíben dichas faldas. De este modo se reduce la forma de perfil invertido y se pierde downforce, que reduce la velocidad en las curvas y por lo tanto incrementa la seguridad, factor muy importante en la F1.

### 3.2.3 Aletas de nariz

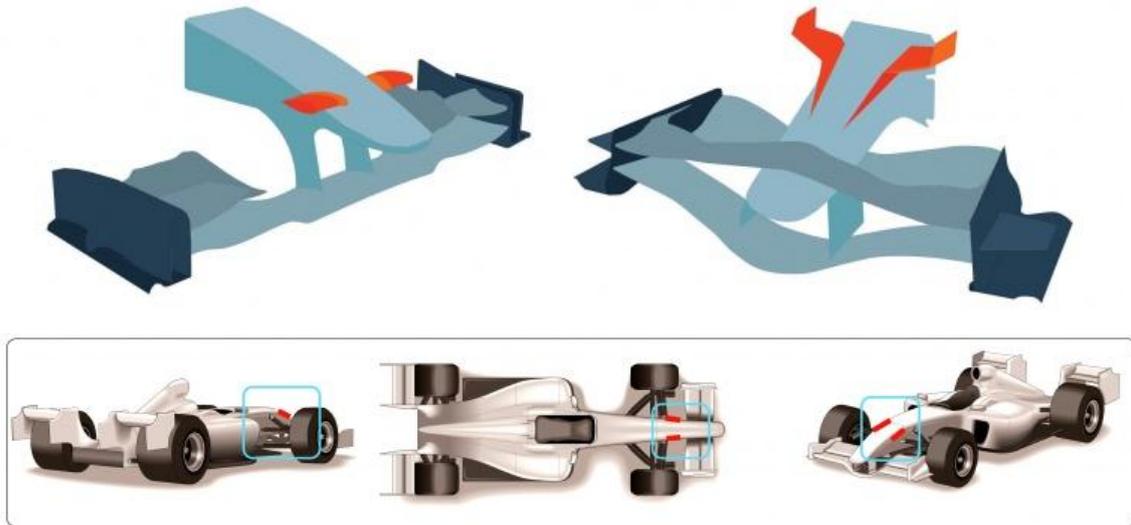


Fig 48. Aletas. [7]

Estos elementos son aletas destinadas a la corrección de los flujos de aire que pasan por la parte delantera hacia la parte media y luego a la trasera.

Independientemente de su orientación, su función no es la generación de empuje, sino redirigir, dividir o repartir el flujo de aire incidente en ellas. Esto permite solucionar inestabilidades, vibraciones o disminuciones de rendimiento en elementos que están por detrás en el flujo de aire, y como ocurre siempre, son elementos añadidos tras la detección de una irregularidad en algún sitio posterior. Por esto, son específicas para cada problema y cada coche. Además suelen tener cortos periodos de vida, pues suele haber soluciones menos costosas en cuando al arrastre (aunque más difíciles de implementar). Existen diferentes tipos de aletas con distintos nombres.

### 3.2.4 Deflectores laterales

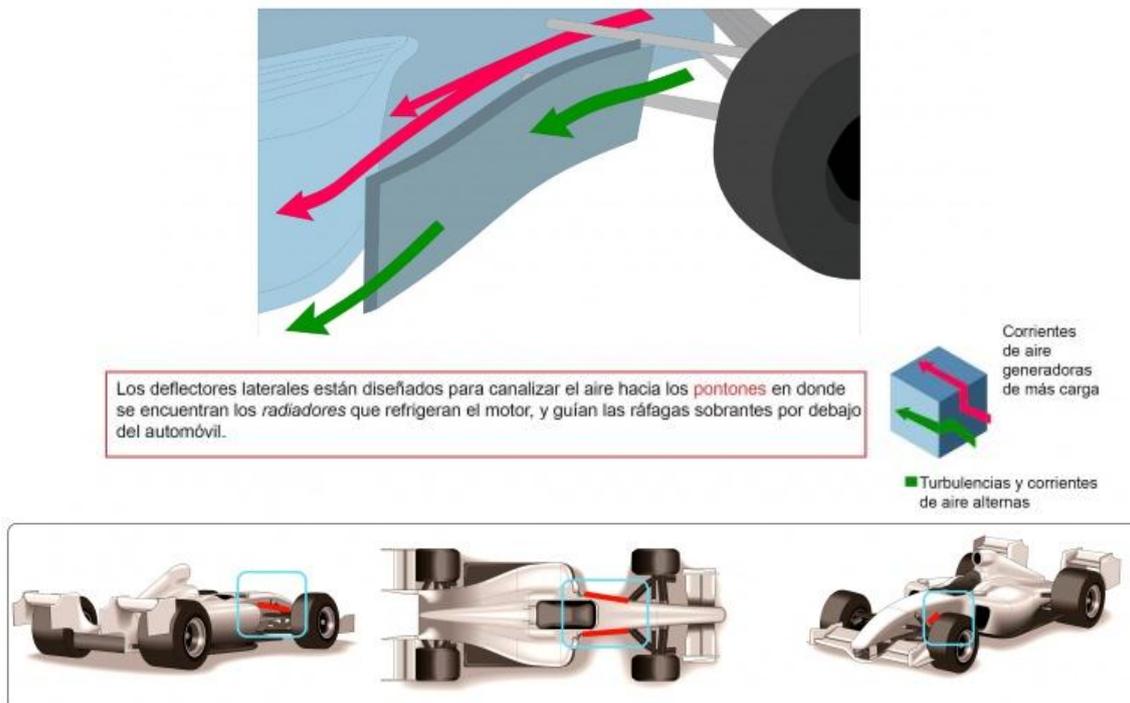


Fig 49. Deflectores laterales. [7]

Los deflectores al contrario que otros elementos aerodinámicos no cumplen la función de generar agarre o downforce, es decir, no se encargan de empujar el coche hacia abajo. Los deflectores tienen una función distribuidora de los flujos del aire.

Se encargan de canalizar el aire hacia los pontones para mejorar la refrigeración, los deflectores imitan la forma del chasis y suelen ir sujetos a la esquina inferior exterior del pontón. También orientan los flujos de aire por debajo del vehículo, en especial, por la zona de los pontones pero orientando el flujo del aire hacia su parte inferior. Seguidamente la base del coche redirige esos flujos de aire hacia el difusor mejorando así el apoyo aerodinámico. El difusor es el elemento del coche que genera más apoyo aerodinámico por sí sólo. Por tanto, si los deflectores mejoran el flujo de aire hacia el difusor la eficacia aerodinámica es mayor.

Las funciones del sistema de deflectores, son cuatro:

1. **Redirigir el aire sucio (turbulento) de las ruedas hacia fuera de los pontones.**

Tanto la zona exterior de los deflectores de la zona de suspensión como el deflector, están diseñados para que el aire sucio desprendido de las ruedas sea canalizado hacia el exterior de los pontones, de forma que ese aire con tanta turbulencia no incida en la carrocería del vehículo.

2. **Separar el flujo de aire hacia la toma de refrigeración.**

Sin embargo, las zonas inferiores de esos deflectores que separan el aire sucio, tienen como misión mantener el aire limpio (laminado y con pocas perturbaciones) dirigido hacia la toma de aire de los radiadores que están en los pontones.

3. **Sellar el fondo para aumentar el efecto suelo.**

Al igual que con el alerón frontal, se pretende generar un sellado de los laterales de los bajos del coche, de tal manera que se potencie la generación de esos vórtices de alta energía, cosa que se produce en la intersección de la placa vertical con el aspa de giro.

4. **Generación de empuje.**

Generar un leve empuje en los extremos en un punto muy bajo y que generalmente suele ser asimétrico, ya que los circuitos al ser cerrados, suelen tender a cargar más curvas a un lado que al otro, así se compensa parte de las necesidades de carga de un lado y otro (haciendo las placas levemente distintas, entre otras medidas).

### 3.2.5 Casco

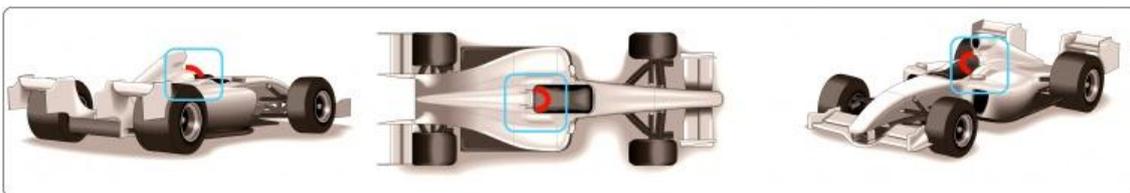


Fig 50. Casco. [7]

El casco de los pilotos, además de una función estética, tiene como función principal proteger la integridad de los pilotos.

El casco es un elemento indispensable y necesario, pero hay que diseñarlo de forma que actúe de forma beneficiosa para la dinámica del vehículo.

Dado el lugar donde se ubica el casco, se puede hacer que actúe en dos aspectos:

- **Adecuando el flujo hacia la toma de admisión.**

Ya que en función de si se canaliza o no el flujo de aire, mediante un apéndice colocado en el alerón delantero, se podrían obtener aumentos de potencia de hasta 5 CV.

- **Adecuando el flujo de aire hacia la parte trasera (alerón trasero y difusor).**

En este caso, la eficiencia del alerón trasero y también del difusor aumentan de forma considerable.

Los diseños de un casco son diferentes en función de la categoría donde se dan.

- Si se pretende canalizar de forma idónea el flujo de aire hacia la toma de admisión, el diseño del casco ha de permitir un flujo superior enfocado hacia la toma de admisión, teniendo en cuenta una desviación de flujo excedente.
- Si se pretende canalizar el flujo de forma adecuada hacia la zona trasera del monoplaza, el diseño del casco debe permitir un flujo a su alrededor con baja resistencia, siendo zona posterior del casco una zona de gran importancia para que el flujo no sea turbulento o cause alteraciones en el mapa de presiones o turbulencias periódicas.

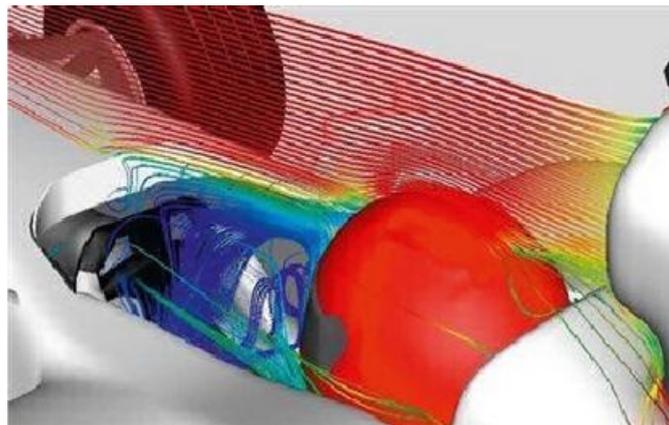


Fig 51. Líneas de corriente alrededor del casco. [7]

Como dato se ha observado que en un vehículo de GP2, la variación de 2 cm en la altura del casco, produce una variación de 5 kilos en la resistencia, que se traduce a caballos de potencia que se restan. Por ello, es indispensable realizar un diseño a la medida de cada piloto y competición.

### 3.2.6 Toma de admisión y anclaje

El anclaje para grúa, es la parte elevada por encima de la cabeza del piloto, que tiene una entrada de aire más o menos grande y está rematada por el alerón superior de la cámara, impuesto por reglamento, al igual que la apertura necesaria para poder levantar el coche mediante una grúa, en caso de tal necesidad.

Es una buena zona para colocar aletas, que pueden tener múltiples aplicaciones, desde generar un alto empuje en la zona central o redirigir los flujos de aire hacia el alerón trasero, hasta corregir inestabilidades o vibraciones innecesarias.

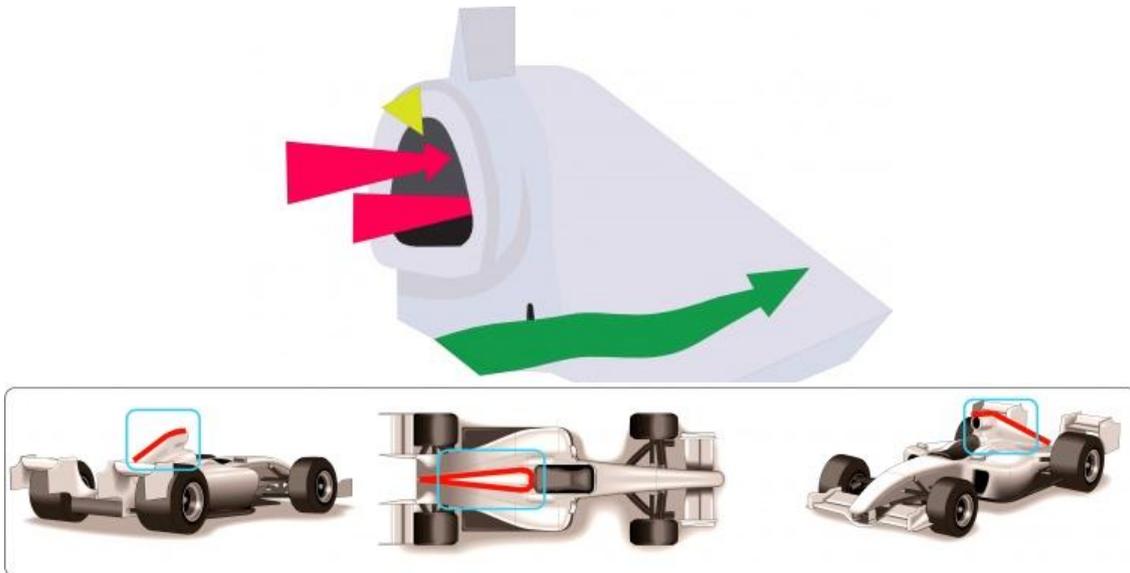


Fig 52. Toma de admisión. [7]

### 3.2.7 Pontones

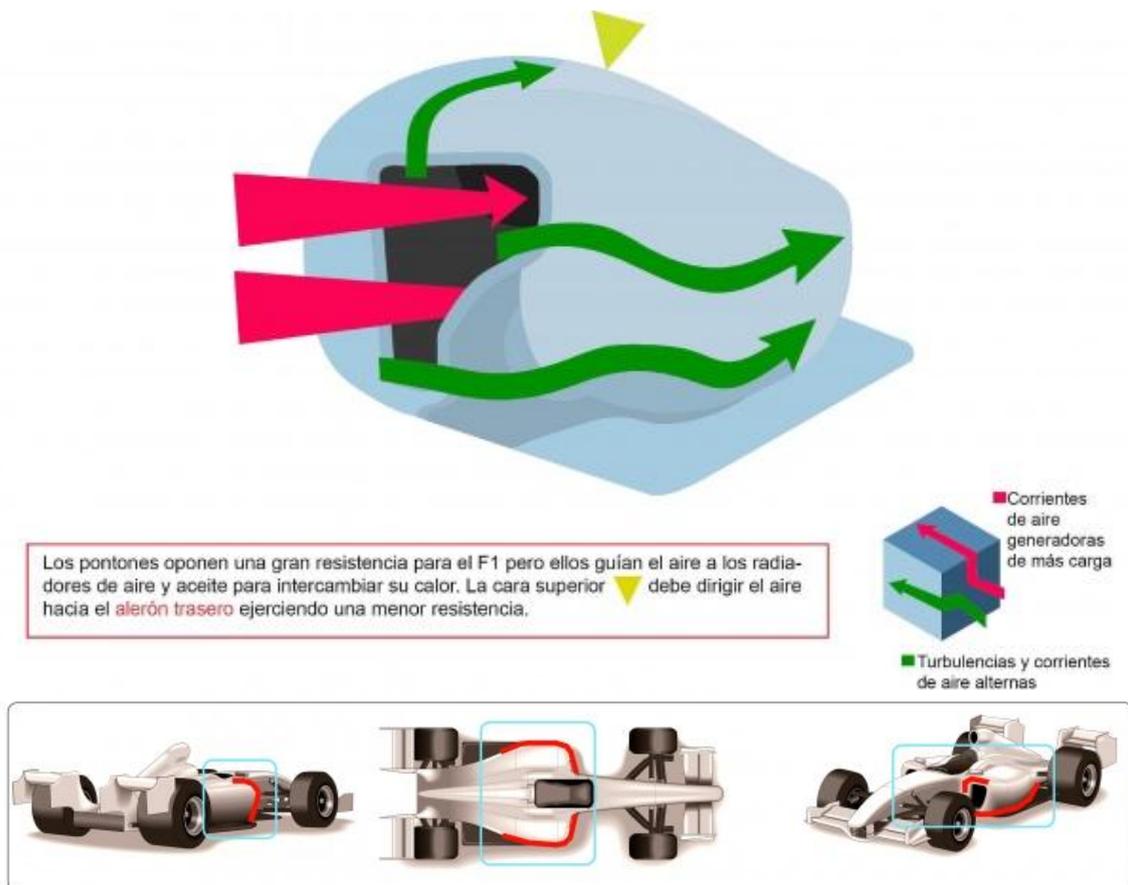


Fig 53. Pontones. [7]

Son la parte ancha y baja de la carrocería que se extienden desde cada lado del habitáculo del piloto hasta el extremo final cubriendo los radiadores (no cubre las tomas de aire). Desde ahí hacia atrás, se van estrechando hacia la zona central trasera, de tal forma que dan forma de botella a la silueta del monoplaza. Esa forma no es causal en la Fórmula 1, ya que se basa en una regla de diseño aeronáutico llamada Regla del área. Esta regla de diseño sirve para reducir la resistencia de

onda producida en el avance de un cuerpo a través de un fluido (relacionada con la compresibilidad del aire), sobre todo en altas velocidades. Es decir, la regla consiste en reducir lo máximo posible las variaciones bruscas de sección transversal del objeto que se desplaza.

Esta regla es fundamental en aeronaves si se quiere sobrepasar el Mach 1 de velocidad, en los barcos también es utilizada y en los vehículos es aconsejable para reducir las vibraciones estructurales. Esto proporciona estabilidad estructural y facilidad para el piloto (no temblará tanto por este motivo), pero no trata las vibraciones causadas por el motor y la suspensión.

### 3.2.8 Aletas de pontón

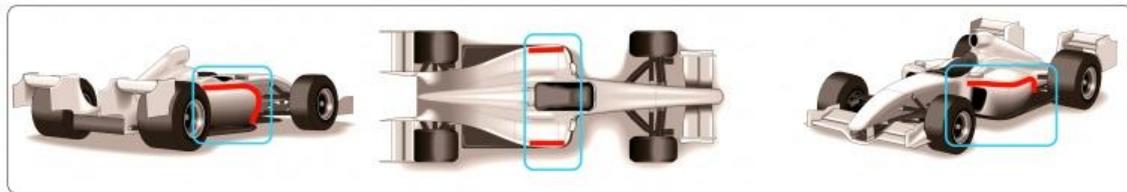


Fig 54. Aletas de pontón. [7]

Parecería evidente que disponiendo de una zona tan amplia como los pontones, se pudiesen llenar con uno o varios dispositivos aerodinámicos que produjeran una gran cantidad de empuje, pero no es necesario tanto empuje debido a que ésta es la zona de mayor peso (motor, transmisión, refrigeración...). En lugar de esto, es preferible mejorar el resto de prestaciones que debe cumplir la zona:

- Canalizar mejor el aire en la entrada de los radiadores.
- Separar el flujo de aire incidente en las ruedas traseras.
- Dirigir el flujo de aire para que incida mejor en el alerón trasero.
- Evacuar el aire caliente proveniente de los radiadores.
- Evitar que los flujos de aire incidan en el chorro de los gases de escape.
- Generación de empuje vertical.

### 3.2.9 Tapa motor

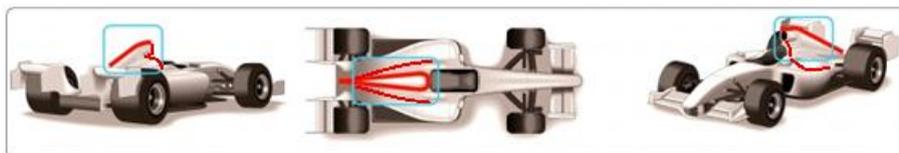


Fig 55. Tapa motor. [7]

Es la parte que se eleva desde la zona horizontal de los pontones. No incluye la toma de aire para la combustión del motor, que está carenada en otra pieza aparte. No suele llevar ningún tipo de elemento aerodinámico, ya que no tiene puntos resistentes para la transmisión de fuerzas al cuerpo del vehículo, aunque ocasionalmente, aparece incorporado algún tipo de divisor de flujo o algún aletín de estabilización.

### 3.2.10 Alerón trasero



Fig 56. Alerón trasero. [7]

La otra mitad de la fuerza vertical del grupo alerón lo produce el alerón trasero. También es multielemento. Como función secundaria, la parte de abajo extrae aire de los bajos del coche.

La configuración del alerón trasero se determina según el tipo de circuito en el que se corra. Existen tres tipos de configuraciones:

- Baja downforce
- Estándar downforce
- Alta downforce

El compromiso trata de lograr una relación óptima downforce/resistencia (downforce necesario para entrar y salir de forma rápida de las curvas y baja resistencia para alcanzar altas velocidades en las rectas). El alerón trasero de tres perfiles en cascada (pequeña cascada de álabes), se utiliza en circuitos lentos y es capaz de producir una fuerza de hasta 13.000 N que también maximiza la resistencia. El alerón estándar utilizado en circuitos mixtos, está formado por dos perfiles que producen menos downforce y resistencia. El alerón elegido en circuitos rápidos es el más pequeño de todos, está formado de un perfil casi plano y produce la mínima resistencia.

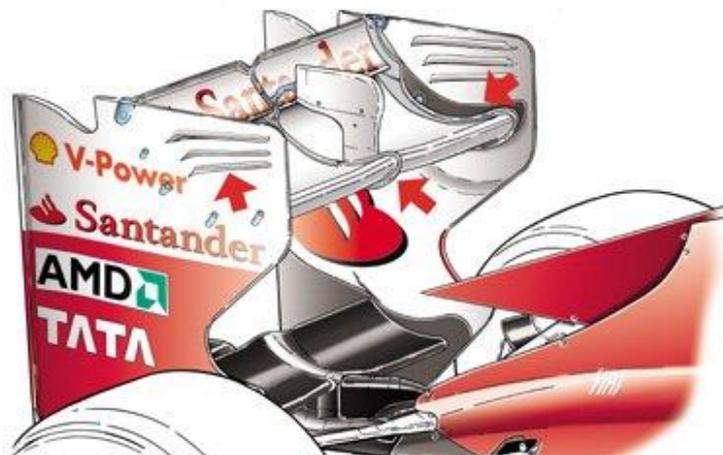


Fig 57. Alerón trasero F1. [7]

El flujo de aire es cada vez más turbulento al moverse hacia la parte posterior del coche. La estela del alerón delantero, los retrovisores, el casco del piloto, las ruedas delanteras, los sidepods y otros elementos influyen en el flujo de aire y provocan que este sea totalmente turbulento al llegar a la parte trasera del coche. Como consecuencia, el alerón trasero no es tan eficiente como el delantero y aun así este debe generar más del doble de downforce para equilibrar el monoplaza. Por tanto el alerón trasero está diseñado para producir un alto downforce. El alerón trasero y las ruedas son los elementos

responsables de la mayor parte de la resistencia. La eficiencia del alerón trasero depende de los mismos parámetros que el alerón delantero (alargamiento, ángulo de ataque y resistencia).

Por tanto, el alerón trasero tiene dos funciones principales:

- Generar el máximo empuje vertical (downforce) con el mínimo arrastre y vibración (drag).
- Crear una zona de baja presión debajo de él, o lo que es lo mismo, encima del difusor.

Esto es difícil de conseguir, ya que el comportamiento del alerón trasero depende de la actuación y la incidencia de elementos anteriores a éste. La normativa que se le aplica a este alerón es estricta, ya que tiene limitaciones de flexión, altura y materiales.

### 3.2.11 Fondo plano

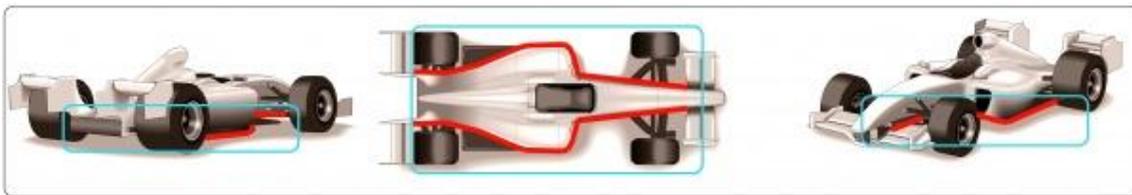


Fig 58. Fondo plano. [7]

El fondo plano es la parte más baja del monoplaza (la parte más cercana al asfalto), ya que es la superficie sobre la que se asienta todo.

El objetivo del fondo plano es hacer que circule la menor cantidad de flujo de aire posible por debajo del coche, para aumentar el downforce. Esto se puede conseguir mediante diferentes métodos:

- Vórtices del alerón delantero en un determinado sentido, para extraer aire de debajo del coche.
- Apéndices colocados debajo de la abertura de los pontones, para desviar y alejar el flujo de aire de la parte baja del coche.
- Labios en los extremos de la superficie del fondo plano, justo debajo de los pontones (a cada lado de la cubierta motor) con el fin de extraer aire de debajo del coche.

En la parte central del monoplaza, se suele colocar como una tabla de madera, para evitar que se desgaste el fondo. Esta tabla la impone el reglamento para evitar que el bajo del coche esté demasiado cerca del suelo, ya que según la normativa tiene que existir una distancia mínima de 100mm entre el fondo plano y el asfalto. De lo contrario, si la tabla se desgasta más de lo que permite el reglamento (1mm), la escudería podría ser sancionada. También se admite otro material que diferente a la madera, cuya densidad esté entre 1,3 y 1,45 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.12 Difusor

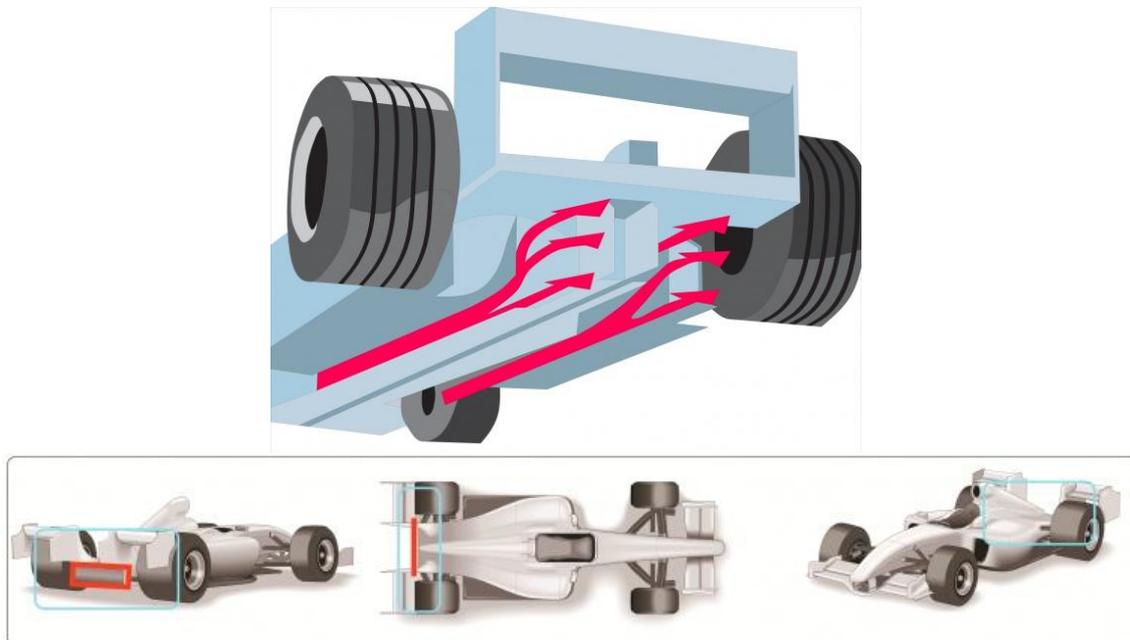


Fig 59. Difusor. [7]

El difusor es otro elemento aerodinámico de considerable importancia en un Fórmula 1, ya que es indispensable para el correcto funcionamiento de todas las partes anteriores.

Se trata de un elemento situado en la parte posterior del fondo del coche (bajo el alerón trasero), que acelera el flujo aerodinámico al modificar el diferencial de presión entre la parte superior (flujo más lento y a presión atmosférica) e inferior (flujo a alta velocidad a baja presión) del coche. Cuanto mayor sea su tamaño y más aire reciba, mayor carga aerodinámica generará.

Su única función es facilitar lo máximo posible la salida del aire que circula por los bajos del coche, generándose así el efecto suelo de forma efectiva, ayudándose de la baja presión generada por el alerón trasero, lo que ayuda a sacar el aire de los bajos a través de este elemento.

Su resistencia al avance es muy limitada y a cambio, es capaz de generar una gran cantidad de carga o *downforce*. En función de sus características, siempre delimitadas por el reglamento, puede llegar a superar el 40% de la carga aerodinámica total que el monoplaza puede generar.

Para entender el funcionamiento de un difusor hay que entender el Principio de Bernoulli, que afirma que cuando la velocidad de un fluido aumenta, la presión disminuye. Para que el coche genere carga aerodinámica, la presión bajo el coche debe ser inferior a la del aire que circula sobre él.

El difusor aplica este principio extrayendo el aire que circula bajo el suelo del coche. Dicha extracción, junto con su ensanchamiento, curvatura y aumento de altura progresivos, permite que se aumente la velocidad de dicho flujo en movimiento entre el suelo y el asfalto. Eso provoca que el aire que circula sobre el difusor lo haga más lentamente, generando esa diferencia de presión y empujando el monoplaza contra el asfalto.

Su diseño es de gran importancia, ya que cuánta mayor velocidad posea el flujo de salida, mayor *downforce* se produce.



## 4 ALERÓN DELANTERO

Actualmente, el alerón de un Fórmula 1 está construido en fibra de carbono y es la primera parte del vehículo en contactar con el flujo de aire. El flujo alrededor de este elemento es mayor que en cualquier otra zona del monoplace, ya que es la en la que el aire incide con menos perturbación. El alerón está diseñado para producir downforce y guiar el aire que se mueve aguas abajo. Para guiar el aire tras las ruedas hacia las entradas del radiador y el inferior del vehículo se utilizan flaps y winglets (pequeños alerones y apéndices aerodinámicos). El aire turbulento que se mueve hacia la parte trasera del vehículo influirá sobre la eficiencia del alerón trasero [7].

La eficiencia del alerón se basa en tres parámetros básicos: el alargamiento, el ángulo de ataque y la resistencia.

- **El alargamiento.** La cantidad de downforce producida por un ala o alerón se determina por sus medidas. Cuanto mayor sea el alerón, mayor downforce produce. El alargamiento es la relación entre longitud/anchura. Cuanto mayor sea el alargamiento, menor es la resistencia creada por los vórtices en las puntas de los alerones. La longitud del alerón es la dimensión perpendicular al flujo de aire y la cuerda es la dimensión paralela al flujo).
- **El ángulo de ataque.** La eficiencia de un alerón depende también de la relación downforce / resistencia. La cantidad de downforce generado también depende del ángulo o inclinación del alerón. Cuanto mayor es el ángulo de ataque, mayor es el downforce producido.
- **La resistencia.** Al incrementar el downforce en un alerón, también aumenta la resistencia. El downforce generado por el alerón actúa en sentido vertical hacia el suelo, mientras que la resistencia actúa en la dirección opuesta al flujo de aire.

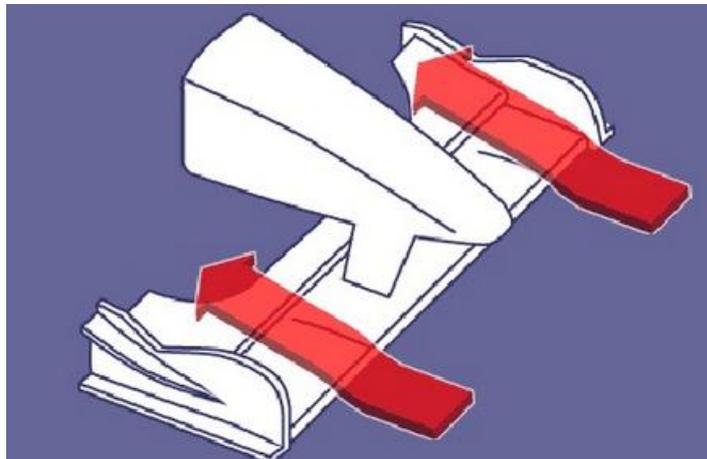


Fig 60. Esquema alerón delantero de F1 y el flujo del aire. [7]

En el momento de la puesta a punto del alerón delantero, los ingenieros deben considerar lo que sucederá con el flujo de aire cuando se desplace aguas abajo a lo largo del vehículo. Para limpiar el flujo de aire perturbado, se añaden unos ajustes en forma de elementos aerodinámicos en la parte delantera. Los deflectores (turning vanes) se utilizan para desviar la estela (pequeño flujo turbulento de baja presión causado por el paso de un objeto a través del aire que produce resistencia de presión) de flujo turbulento lejos de las ruedas delanteras y el alerón delantero. Este efecto, aleja al aire perturbado de las entradas de los radiadores y de la parte inferior del coche.

Para las carreras en circuitos más lentos, es posible añadir pequeñas secciones verticales en el alerón, ineficientes en circuitos rápidos por su producción de resistencia aerodinámica. Los alerones para las configuraciones de circuitos rápidos son muy pequeños y funcionan más como elementos

estabilizadores que como generadores de downforce. Dicha configuración es capaz de producir una fuerza de 6.650 N.

Las ruedas delanteras y traseras son la mayor fuente de resistencia de un Fórmula 1. Esto provoca hasta un 60% de ineficiencia aerodinámica (el aporte en la resistencia total suele ser de un 40%).

El conjunto del alerón delantero posee unas placas perpendiculares en sus bordes laterales, denominadas derivas o endplates, que permiten reducir la turbulencia que hay alrededor de las ruedas y ayudar al flujo de aire a moverse hacia los radiadores y alrededor de los sidepods. Cualquier cambio que se realice en la parte delantera del vehículo afectará al flujo de aire que se desplaza hacia la parte trasera. El equipo de ingenieros tiene que tener en cuenta que cualquier cambio en el alerón delantero tendrá un impacto sobre la eficiencia aerodinámica global del vehículo.

El alerón delantero genera el 33% del downforce total del monoplace, envía la corriente de aire a las ruedas de forma que no generen mucha resistencia (gracias al conjunto de lengüetas laterales), alimenta a la parte baja del monoplace y canaliza el flujo de aire de la forma deseada hacia la parte trasera del monoplace. Otra función que realiza el alerón delantero gracias a su forma, es la de deflectar aire hacia los frenos para mejorar su refrigeración.

La idea y el problema principal en diseño es buscar una solución de compromiso entre la generación de fuerza vertical y el desvío de aire a otras partes del coche.

#### **4.1 Variación del ángulo de ataque del alerón delantero**

Al hacer variar el ángulo de ataque del alerón, se modifica el ángulo de incidencia del flujo de aire no perturbado que llega al vehículo; cuanto mayor es el ángulo de ataque, mayor es la presión que ejerce el aire sobre el alerón y por tanto, mayor es la fuerza resultante sobre éste, como consecuencia, aumenta el downforce al mismo tiempo que aumenta la resistencia aerodinámica. Existen dos consecuencias favorables:

- **Velocidad máxima/Downforce máximo.** Permite que el monoplace alcance la velocidad punta en una recta (ángulo de ataque nulo) cuando se minimiza la resistencia en el alerón, y posteriormente aumentar el ángulo de ataque para obtener más downforce y realizar a mayor velocidad las curvas rápidas.
- **Facilitación de adelantamientos.** Su uso más importante es el de facilitar los adelantamientos. Cuando un monoplace sigue de cerca a otro, debido al aire turbulento se produce una pérdida de downforce en la parte delantera del monoplace que termina traducándose en subviraje para el monoplace. De esta forma, ajustando el alerón se puede compensar esa pérdida de downforce y evitar en la medida de lo posible el subviraje.

Dependiendo de cada circuito, los ingenieros se encargan de adaptar las características del alerón a las necesidades físicas específicas.

Si no se pudiese orientar durante la carrera a las condiciones cambiantes de la misma (en una misma recta el piloto puede ir delante o detrás de otro monoplace), sería necesario disponer de un alerón flexible. La elasticidad de los materiales empleados y el diseño son elementos críticos a la hora de estudiar la eficiencia.

## 4.2 Funciones

En un Fórmula 1, la adherencia y la tracción se consiguen gracias a la carga vertical. Cuanta mayor carga vertical (peso) tenga una rueda sobre sí misma, más superficie de contacto tendrá y mayor será la interacción contra dicho pavimento. Esto se explica porque la tracción está relacionada con el peso a través del coeficiente de adherencia.

$$F_{\mu} = W \cdot \mu \quad (7)$$

Donde:

- **$F_{\mu}$ : Fuerza máxima por adherencia.**
  - Fuerza máxima cortante (longitudinal o lateral al neumático) que puede soportar el área de contacto neumático carretera.
  - Caracteriza "la resistencia al deslizamiento".
- **$W$ : Carga vertical**
  - Aplicada por el neumático sobre el suelo en la rueda que soporta el esfuerzo cortante.
- **$\mu$ : Coeficiente de adherencia**
  - Caracteriza la capacidad de soportar esfuerzos cortantes del área de contacto.
  - Es función de las características y el estado de la superficie de rodadura y en menor medida del neumático.

Los alerones son elementos cuya forma, dada la interacción con el flujo de aire, crea una fuerza descendente que aumenta virtualmente el peso del coche y permite un mayor agarre y mayor velocidad en las curvas. Además permite equilibrar el balance entre los ejes, ya que si sólo existiera carga en la parte trasera, la parte delantera podría levantarse al acelerar.

Las funciones más importantes de los alerones delanteros de un Fórmula 1 son las siguientes:

- **Generar la carga aerodinámica** necesaria para permitir el control completo sobre la dirección del monoplaza y evitar el subviraje (consiste en girar menos de lo que debería ya que el neumático no ofrece todo el contacto con el neumático que se necesitaría). Esto se consigue mediante unos perfiles de ala invertida cuya superficie inferior es más curva que la superior de forma que el aire tiene que viajar más rápido para llegar al punto final del alerón a la vez que el aire que viaja por arriba. Al ir más rápido el aire genera bajas presiones que hacen un efecto similar al vacío empujando el coche hacia abajo y agarrándolo al asfalto, lo que se conoce como carga aerodinámica.

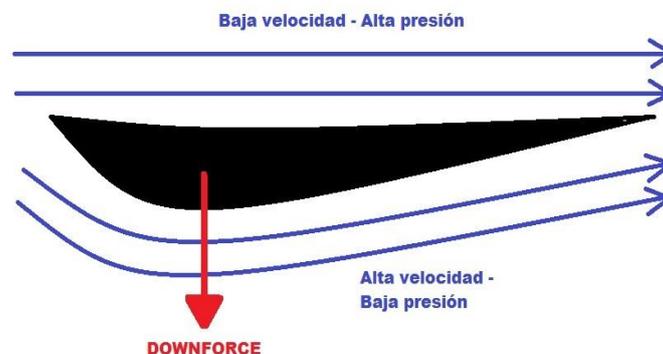


Fig 61. Esquema de presiones para la generación de downforce. [7]

- **Conducir el aire** para evitar el contacto directo con la rueda, lo que disminuiría la velocidad del monoplaza. Este efecto se aprecia al sacar la mano por la ventanilla del coche: al colocar la mano en horizontal, el aire pasa y casi no ofrece resistencia, pero a medida que aumenta la

inclinación de la mano, ofrece mucha más resistencia al paso del aire, observando una mayor dificultad para rodear lo que se encuentra. Al ayudar al aire a esquivar, se consigue que el coche disminuya su resistencia al aire, la cual frena al vehículo.

Se busca que el flujo de aire alrededor del monoplaza sea lo más laminar posible. El flujo turbulento genera más resistencia aerodinámica y es el que recibe el alerón delantero. Éste reparte el flujo alrededor del monoplaza para permitir que los bargeboards, sidepod, difusores y otros elementos del monoplaza funcionen correctamente.

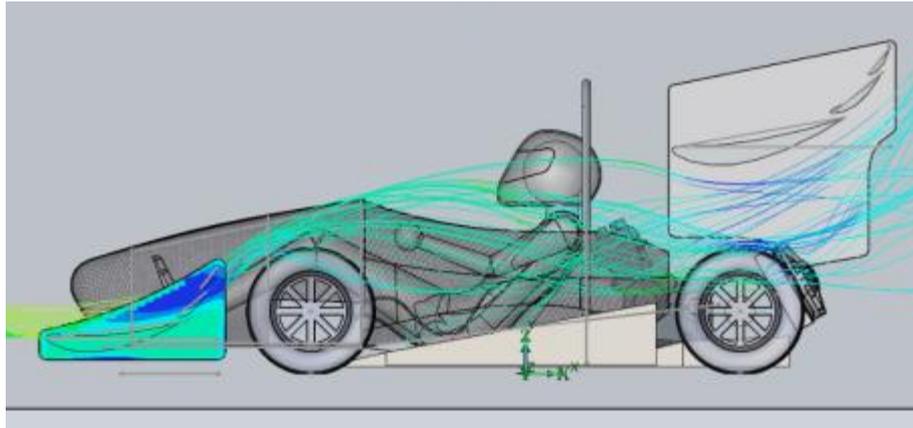


Fig 62. Desviación del flujo de aire mediante el alerón delantero. [7]

En esta imagen se observa como el alerón frontal permite al aire evitar el choque con la rueda reduciendo el drag, además de generar mucha carga aerodinámica para conseguir aumentar la tracción y la capacidad de manejo del monoplaza.

- **Conducir el aire** hacia las zonas deseadas, por ejemplo el splitter, el fondo plano o los conductos de refrigeración para los frenos.
- Soportar los **impactos frontales** protegiendo a la célula de habitabilidad del monoplaza, deformándose y absorbiendo la mayor parte de la energía en las colisiones. Por ello se busca que los morros (nosecones) sean completamente seguros, tanto en impactos frontales como en posibles impactos contra otros monoplazas.



Fig 63. Impacto frontal. [7]

Cada equipo elige el diseño del alerón y el morro en función de la forma y función del resto del monoplaza. Las configuraciones de alerones son infinitas y han evolucionado a lo largo de los años e

incluso de equipo a equipo en las mismas temporadas. Estos se componen fundamentalmente de fibra de carbono y en su interior se encuentran otros elementos como sensores, que permiten recopilar información de todo lo que sucede en el alerón (carga aerodinámica, flexión).

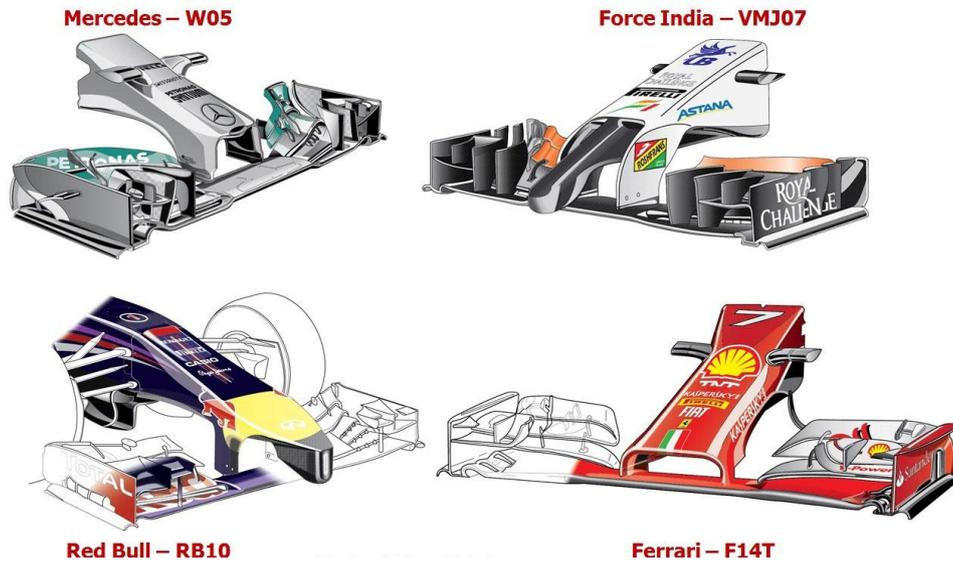
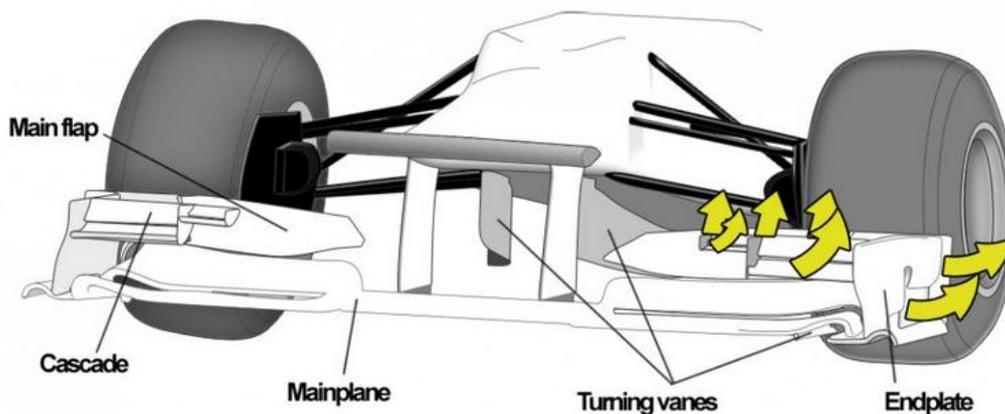


Fig 64. Diferentes tipos de alerones según el equipo. [9]

### 4.3 Elementos del alerón delantero

El perfil aerodinámico de un alerón delantero está diseñado de modo que ayude a mantener el coche en el suelo y las ruedas en contacto con la superficie. Por lo tanto, juega un papel importante para asegurar el agarre y la tracción para el coche.

El alerón delantero posee un diseño en el que se aprecia una forma opuesta al perfil aerodinámico. El alerón delantero está suspendido de la nariz o morro, y se extiende a lo largo de toda la anchura del coche. A este plano principal se fijan flaps ajustables y en los extremos del plano principal se unen los endplates. Las diferentes partes del alerón delantero se muestran en la siguiente imagen.



El

Fig 65. Partes principales del alerón delantero. [7]

mainplate y los endplates aseguran que el flujo de aire fluya por encima y por debajo del perfil aerodinámico. Los endplates juegan un papel importante en la reorientación del flujo de aire alrededor de los neumáticos, los cuales no son buenos aerodinámicamente.

### 4.3.1 Mainplane

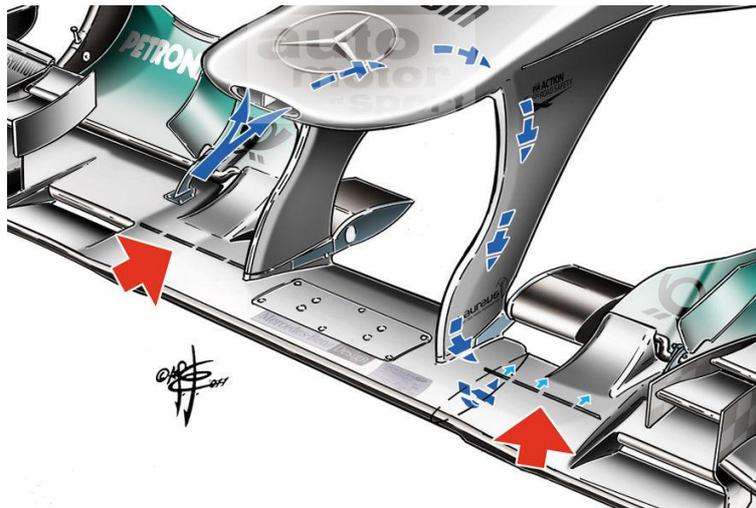


Fig 66. Mainplane. [9]

El ala principal (mainplane) es la pieza que se utiliza como soporte del resto de los componentes del alerón. Ocupa la mayor parte de la anchura del vehículo y se une al morro por medio de dos pilones que varían dependiendo del diseño.

La FIA investigó sobre cómo mejorar los adelantamientos y obtuvo que los alerones anchos facilitaban estas maniobras, pero también observaron que aumentando su tamaño proporcionaría demasiada ayuda, con lo que en 2009 obligaron a los equipos a diseñar sus alerones con una sección central que se ajustara a una plantilla que estaba fijada por la FIA. De este modo, se reducía la carga que podía crear el alerón en su conjunto pero se obtenían los beneficios de tener los extremos más grandes, lo que hacía menos sensible a las turbulencias cuando el vehículo circulaba junto a otro rival. Así, esta sección central es neutra, es decir, no ofrece ayudas, y los equipos no pueden inclinarla para que lo haga. Con esta medida los monoplasas pueden circular más pegados sin verse perturbados por la estela del coche que le precede y así facilitar las maniobras de adelantamientos a los pilotos.

El canal central del morro recibe la mayor cantidad de aire libre de turbulencias para ser distribuido por el suelo hasta el difusor. Todos los vehículos, han utilizado la combinación del ala principal con los pilares que lo fijan al morro para crear una especie de tubo que potencia el efecto Venturi, lo que permite generar carga en una zona que estaba desprovista de ella.

### 4.3.2 Endplates

Los endplates son uno de los elementos más importantes del alerón delantero. La optimización de su forma y posición puede ayudar significativamente a mejorar la aerodinámica general. Los endplates tienen 5-10 veces más efecto que la mayoría partes. Controlan el flujo de aire alrededor del coche, redirigiendo el flujo de aire alrededor de los neumáticos. Esto minimiza la resistencia de arrastre global producida y facilita que el aire fluya para continuar hacia los side pods y la parte baja del automóvil.

Se han producido muchos cambios, y en la actualidad las ruedas están mucho más cerca del chasis que hace varios años. Además, las puntas de los alerones delanteros coinciden con los extremos de los neumáticos. Esto crearía una turbulencia innecesaria delante de las ruedas y aumenta la resistencia. Por lo tanto, los bordes interiores de los endplates son curvados para asegurar que el aire fluya alrededor de los neumáticos.

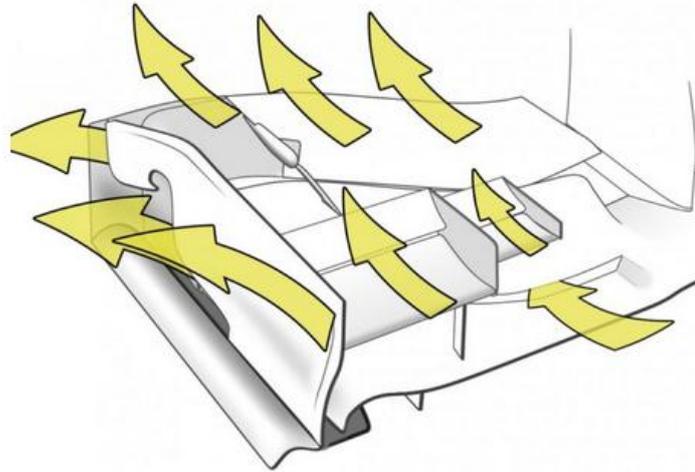


Fig 67. Flujo de aire alrededor del endplate. [9]

La función principal de estos endplates es sellar la zona de aire de alta presión que recorre la superficie superior del alerón con respecto a la superficie inferior del mismo, donde el aire circula a más velocidad y, por lo tanto, con menos presión. De lo contrario, se produciría una no deseada turbulencia, ya que el aire de alta presión tendería a desplazarse a la zona de menos presión. Las orientaciones que pueden adquirir estos endplates son outwash (hacia fuera) o inwash (hacia dentro). Inwash se utiliza para refrigerar los frenos y llevar aire hacia los pontones y radiadores, mientras que outwash se utiliza para tener más downforce en el difusor, pero con la desventaja de tener más problemas para refrigerar. Además, otra función importante del endplate es retirar el flujo de aire que va hacia las ruedas quitando el frenado extra de este flujo sobre las llantas (las ruedas delanteras generan el 40 % de la resistencia total del coche).

Los endplates no permiten que el aire turbulento creado por el neumático delantero se introduzca por debajo del coche. Algunos coches también utilizan una especie de vallas verticales, llamado splitter, unido a la superficie inferior del ala delantera, que sirve para ayudar en la funcionalidad de los endplates.

### 4.3.3 Wing Flaps

Sobre el ala principal se instalan una serie de alerones secundarios (flaps) a cada lado del cono de la nariz que normalmente son asimétricos. No hay restricciones a la hora de colocar elementos sobre el alerón. Poseen formas complejas y suelen estar unidos a las derivas laterales, o fijados al ala principal mediante unos dispositivos que permiten cambiar el ángulo de ataque de una manera sencilla para ajustar la parte delantera del vehículo a las preferencias del piloto en el caso de aparecer sobre o sub viraje.

Estos flaps disminuyen su tamaño a medida que se acercan al morro con el fin de cumplir una función de eficacia global. Esta disposición facilita que el aire fluya hacia los radiadores y hacia el suelo. Si la altura de los wing flaps fuese igual que la del cono de la nariz, se reduciría el aire total que va hacia los radiadores, lo que provocaría un aumento en las temperaturas del motor.

Esta forma asimétrica también permite un flujo de aire más favorable hacia el suelo y el difusor, aumentando el downforce. La normativa de la FIA establece que el mainplane se localice en el centro, así como un diseño común para todos los vehículos.

Los alerones secundarios permiten reducir la resistencia que generan las ruedas, facilitan que llegue un flujo de aire fresco a los pontones donde se sitúan los radiadores para mejorar la refrigeración y crean vórtices que canalizan de forma eficiente aire a la zona del difusor.

Las ruedas generan la mayor fuente de resistencia. Esto provoca hasta un 60% de ineficiencia aerodinámica (el aporte en la resistencia total suele ser de un 40%). Esto se mejora impidiendo que la mayor parte del flujo que pueda incidir sobre ellas sea desviado hacia los laterales, y en menor proporción, curvarlo hacia arriba para que incida en la mitad superior de la rueda, una zona donde la resistencia es menor debido a que facilita el paso de aire por arriba. El endplate, los flaps y la parte externa de las alas son los responsables de conseguirlo.

El número de alas secundarias es ilimitado, pero éstas deben ser fijas y no móviles, es decir, no pueden ser modificadas cuando el coche está circulando. Los ingenieros instalan ciertos dispositivos en las alas secundarias que permiten realizar las modificaciones de carga fácilmente variando el ángulo de ataque de las alas (a mayor ángulo, mayor carga). Los alerones delanteros tienen que pasar por pruebas de esfuerzo para comprobar que el elemento sea rígido y no demasiado flexible, ya que esto disminuye la altura del ala con respecto al suelo y con ello aumenta la carga que genera.

Al pasar la zona de las ruedas, la superficie del ala va disminuyendo para cambiar la función que debe realizar. La zona intermedia desempeña una doble función:

- Desviar hacia arriba suficiente aire para que llegue a los radiadores y una pequeña parte que también pueda alimentar las tomas de refrigeración de los frenos. Si se mantuviera constante la altura y no se redujera, no llegaría el suficiente flujo a los pontones y la temperatura del motor se elevaría demasiado.
- Originar un vórtice, que es canalizado a lo largo del vehículo, que pasa junto a la parte interior de la rueda y las suspensiones.

#### 4.3.4 Turning vanes

Los generadores de vórtices que se encuentran en la parte delantera del monoplace son los turning vanes, que son unos deflectores verticales, generalmente curvados, acoplados en cada lado del chasis entre las ruedas delanteras y las tomas de aire de los pontones.

Las turning vanes poseen varias funciones, pero principalmente se utilizan para ayudar a controlar la estela turbulenta de las ruedas delanteras y para depurar el aire del alerón delantero y debajo del chasis, redirigiendo el flujo de aire hacia los pontones, la parte inferior, el difusor o lejos del vehículo.

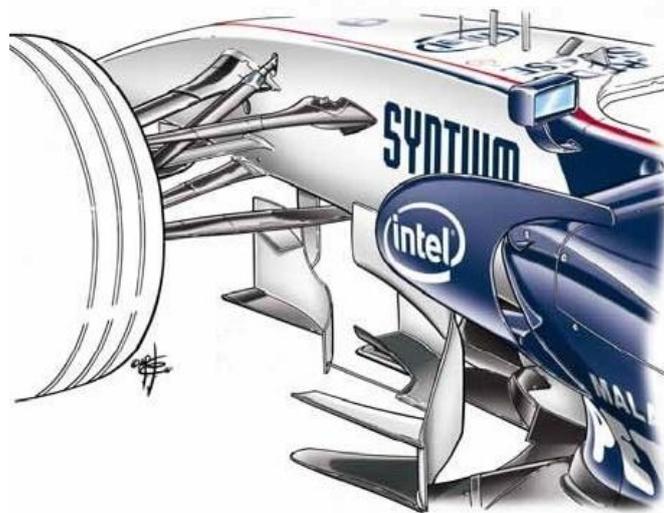


Fig 68. Turning vanes BMW 2007. [9]

En diseños más actuales, se reemplazaron por generadores de vórtices que redirigen los vórtices bajo el coche con el objetivo de alimentar el difusor trasero con flujos de alta energía y aumentar así la eficiencia del difusor.

El borde posterior inferior de las turning vanes crea un vórtice que se desplaza hacia abajo del borde inferior exterior del pontón lateral, actuando como una barrera y ayudando a sellar el área de presión inferior por debajo del coche, consiguiendo un efecto suelo.

Además se utilizan para reducir la velocidad del aire que entra en los pontones laterales, y por lo tanto, la velocidad y la cantidad de aire que llega a los radiadores, reduciendo el drag de los pontones laterales.



Fig 69. Turning vanes Ferrari. [9]

### 4.3.5 Técnicas de control de flujo

Algunos elementos que pueden alterar el campo de flujo incluyen generadores de vórtice, elementos de soplado / succión y superficies en movimiento.

#### 4.3.5.1 Generadores de vórtice

Los generadores de vórtice son la primera solución para cualquier problema de flujo. Tratan de modificar el flujo mediante la redistribución del impulso global. El fluido con alto momento se introduce en la capa límite.

Los generadores de vórtices son unas placas o extremos acoplados a los Fórmula 1 que provocan que el flujo de aire que está pasando por una zona salga a partir de ahí en forma de espiral o torbellino.

#### Formación de vórtices:

Los vórtices se crean como consecuencia de la interacción de ciertas superficies de un vehículo de Fórmula 1 con el flujo de aire a altas velocidades.

Como efecto, el aire a alta presión que pasa alrededor de los extremos exteriores del perfil aerodinámico por debajo del plano, tiende a ser aspirado en la región de baja presión que se encuentra por encima. La velocidad a la que se produce este proceso da lugar a una rotación de la masa de aire que se extiende desde el borde de salida del perfil aerodinámico, formando un vórtice alargado. Debido a que existe una fuerza impulsora constante de flujo de aire en sentido contrario, los vórtices continúan formándose a medida que aumenta la velocidad. Cuando la velocidad disminuye, los vórtices se van reduciendo hasta que no se forman cuando la velocidad es demasiado baja.

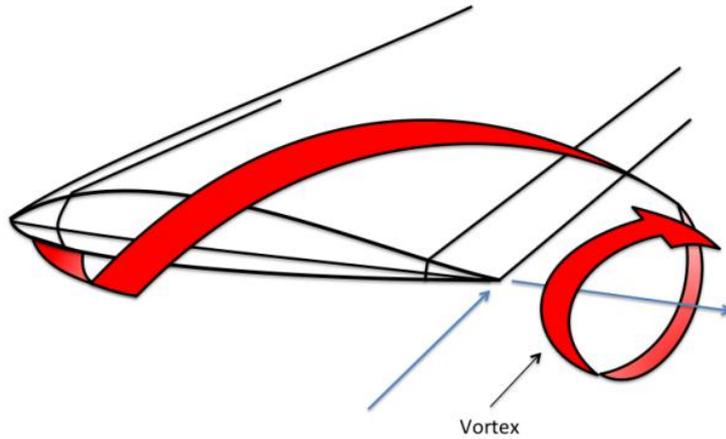


Fig 70. Formación de vórtice en el borde del perfil. [7]

Los vórtices se forman de manera inevitable, y dependiendo de la zona donde aparezcan, se utilizan para sacarles el máximo beneficio posible o se intentan minimizar.

La función de un vórtice es mejorar la dinámica del aire, logrando diversos efectos como redirigir el aire hacia ciertas zonas, conseguir controlar o eliminar turbulencias, alimentar con más aire una zona concreta del monoplaza, evitar al rotura de la capa límite del aire, sellar aerodinámicamente zonas del coche, generar downforce o reducir el drag de algunas zonas como los pontones.

Un generador de vórtices es capaz de cambiar el comportamiento del aire, consiguiendo que el flujo de aire no siga direcciones contraproducentes para el aire que llega.

De forma global, los VG previenen la separación del flujo. Generalmente están alrededor de la altura de la capa límite local y se colocan a una altura de unas 20 veces la altura de la capa límite local antes del punto de separación. Pueden ser utilizados para generar succión de vórtice, añadir fuerza de apoyo y ayudar a guiar el flujo.

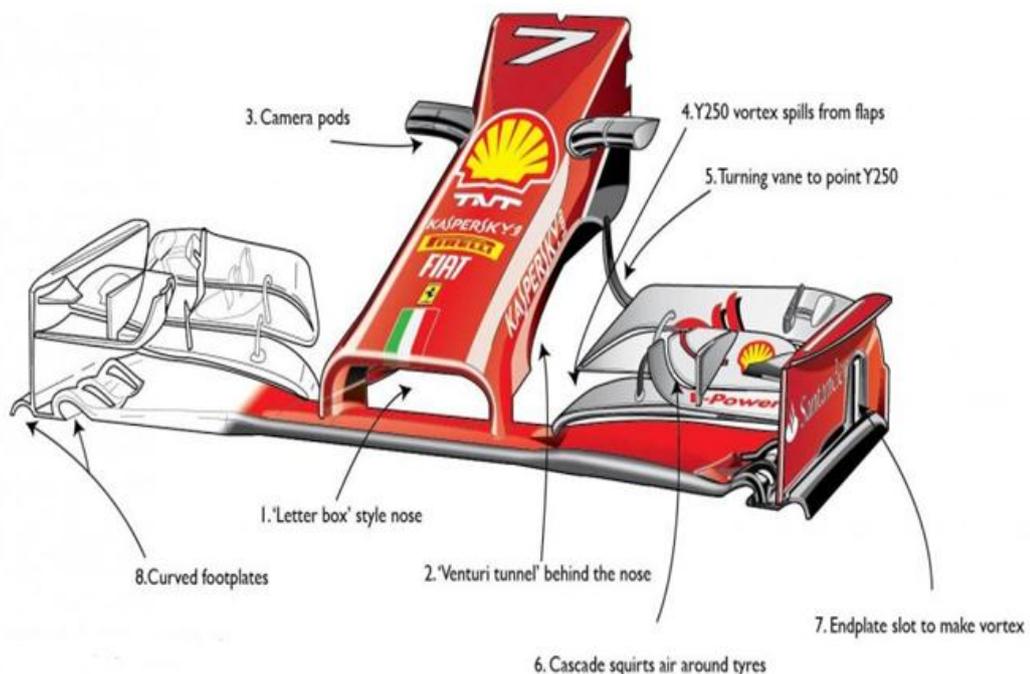


Fig 71. Componentes del front wing. [9]

Los vórtices son remolinos que se crean para canalizar mejor el flujo de aire a la parte trasera del vehículo. Se forman por la interacción del flujo de aire con dos o más superficies, lo que origina que el aire empiece a describir un movimiento circular muy rápido. Cuanto mayor sea la fuerza de giro, mayor será la cantidad de flujo que arrastrará, haciendo circular al aire de manera más rápida y eficiente, que produce un aumento en la carga aerodinámica sobre el alerón delantero. Un vórtice canalizado de forma correcta a lo largo del vehículo, también genera carga en la parte trasera, ya que aumenta la cantidad de aire que llega al difusor (de otra forma no llegaría). Así se consigue una diferencia de presión mayor entre la parte superior e inferior mejorando su eficacia.



Fig 72. Vórtice creado en la parte interna de la rueda. [GP Library]

La FIA obliga a diseñar una sección neutra central de 50 cm en el centro del morro del vehículo. En vez de utilizar todo este espacio para dirigir aire libre de turbulencias a la parte trasera, los ingenieros prefieren utilizar una parte de esta zona neutra para esta función (normalmente la zona de debajo del morro) y el resto para crear un vórtice de gran potencia (Y250) mediante los bordes más próximos al canal central del alerón.

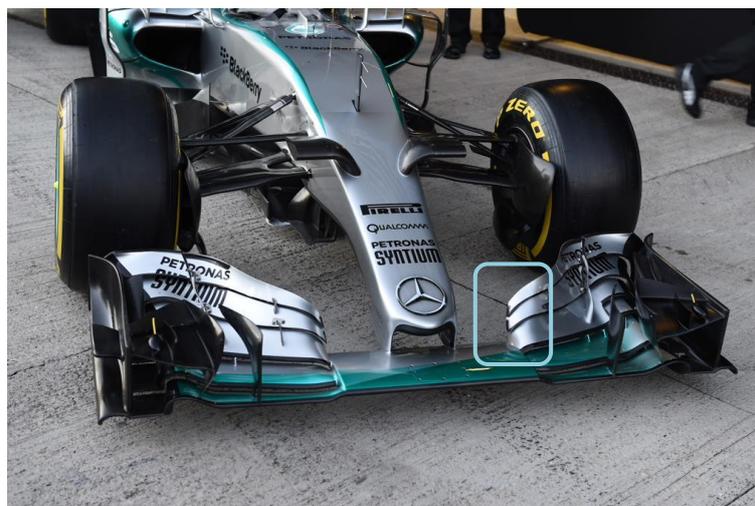


Fig 73. Turning vanes. [GP Library]

Su nombre es debido a que su centro se sitúa en un eje imaginario a 250 mm del eje central del vehículo. Este vórtice tiene también succiona aire del fondo plano, con la derivada mejora aerodinámica del conjunto y así sellar mejor el difusor. Al extraer aire del inferior del monoplaza, se genera una especie de vacío que pega más el coche al suelo.



Fig 74. Línea de recorrido del vórtice Y250. [Elaboración propia]

En la imagen se ve como la línea del vórtice se extiende desde el alerón delantero hasta el difusor. Cuanto más perfecto sea el vórtice Y250 creado, más aceleración tendrá todo el aire que circula por debajo del monoplaza y mejor sellado estará el difusor.

Todos los elementos de las alas secundarias que componen la sección más cercana al morro están orientados a crearlo; además hay una serie de elementos a lo largo del vehículo que se encargan de dirigirlo. La función de guiado del flujo es realizada por los pilares frontales que unen el ala con el morro, las paletas situadas bajo el morro (turning vanes) y los bajos de los pontones.

Los pilares frontales y los turning vanes dirigen el vórtice al mismo tiempo que no permiten que éste extraiga aire sin turbulencia del canal central; debido a esto, poseen una forma curvada hacia el exterior que permite adaptarse mejor a la forma circular del remolino. El objetivo buscado es que el torbellino fluya a lo largo del vehículo con las mínimas alteraciones para que llegue con gran parte de su energía al difusor y éste sea más eficiente.

Lograr que los dos vórtices generados circulen sin interferirse y próximos entre sí es complejo. En ocasiones aparecen problemas debido a este efecto, es decir, dos vórtices girando en sentidos opuestos situados tan cerca que interactúan entre sí acelerándose mutuamente y aumentando drásticamente la carga aerodinámica como consecuencia de que succionan mayor cantidad de aire sobre el alerón delantero.

Cuando el vehículo circula a velocidades muy altas, la cantidad de aire que llega a estos elementos aumenta de forma considerable, por eso es necesario realizar una evacuación eficaz. Los ingenieros deben ser capaces de posicionarlos a una distancia adecuada.

Los equipos tienden a crear la mayor cantidad posible de carga aerodinámica en partes externas del alerón delantero, aumentando la presión en dichas zonas y dejando libre de perturbaciones la zona interna.

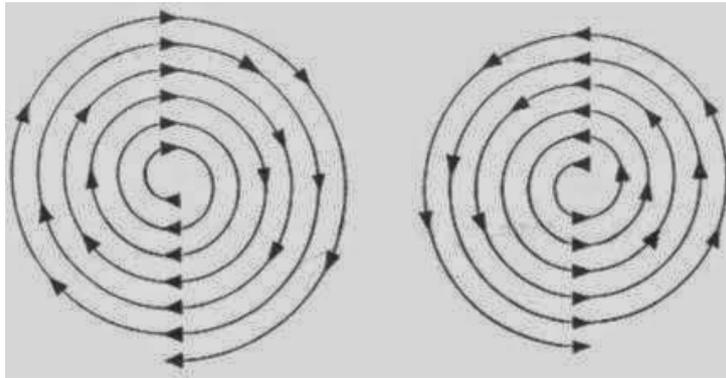


Fig 75. Vórtices interactuando entre sí. [7]

Colocando/quitando flaps o aumentando/disminuyendo sus ángulos de ataque se puede hacer variar la carga de los Fórmula 1 para adaptarse a cualquier circuito, pero al generar carga siempre se producen perturbaciones que pueden interferir en otras partes del vehículo, por eso es necesario desviar estas perturbaciones hacia los extremos para gestionar mejor el flujo de aire que se canaliza por el centro del coche.

La tendencia general de los equipos es utilizar un diseño de ala estándar, es decir encontrar un diseño del alerón constante en sus elementos principales (ala principal, mismo número y forma de las secundarias) que permita una circulación óptima del aire por el coche y dejar ciertos elementos secundarios que se pueden ir añadiendo o quitando dependiendo de las necesidades de los circuitos.

#### 4.3.5.2 Elementos de soplado / succión

El soplado se puede utilizar para inyectar aire de alta energía en la capa límite, mientras que la succión permite eliminar la capa límite agotada. Por lo general, no se utilizan ampliamente debido a requerimientos de potencia y pesos adicionales. Sin embargo, ambas son ideas muy interesantes que pueden utilizarse eficientemente para reducir el arrastre mediante el diseño cuidadoso de la ranura de soplado / succión. Algunos de los más famosos son el McLaren F-ducto, la reducción de arrastre de Lotus y Red Bull S-duct.

#### 4.3.5.3. Superficies móviles

Las superficies móviles no se han utilizado hasta ahora en el alerón delantero, pero definitivamente es una idea para el futuro. La idea reside en crear una superficie que se mueve a la misma velocidad que el flujo y por lo tanto permite reducir el movimiento relativo. Esto podría ser una manera extrema de conducir el flujo.



## 5 MATERIALES

Actualmente, la Fórmula 1 posee la tecnología más avanzada en sus diferentes áreas: aerodinámica, motor, tracción, transmisión, neumáticos, volante, sistema de frenado, electrónica y materiales. En cuanto a los materiales, los más utilizados son las aleaciones ligeras, los materiales cerámicos, los adhesivos, las fibras y los materiales compuestos.

La Fórmula 1 es uno de los deportes relacionados con el sector del motor más famosos del mundo. Debido a la gran competencia dentro del área y los elevados requerimientos físicos a los que se ven sometidos los vehículos durante las carreras, son necesarias las técnicas de procesamiento más avanzadas y la utilización de los materiales más innovadores.

La ciencia de los materiales desempeña un papel importante en el diseño y la fabricación de estos vehículos, ya que se busca eficiencia y seguridad.

Los avances tecnológicos en los materiales han permitido la construcción de coches más ligeros, más seguros y más rápidos [11].

La introducción del chasis de materiales compuestos fue un punto crucial en la historia del desarrollo de vehículos de F1. En la actualidad, los materiales compuestos de fibra de carbono se utilizan ampliamente en muchos de los componentes de la F1.

Los materiales compuestos utilizados en la F1 han sido usados para producir piezas con una elevada rigidez con un peso menor, pero ahora los ingenieros están estudiando, mediante diferentes formas de orientación de las fibras, obtener materiales con una flexibilidad controlada.

### 5.1 *Materiales compuestos*

Un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases que lo constituyen. Están formados por dos o más materiales distintos entre los cuales no se producen reacciones químicas.

Son importantes en ingeniería, ya que permiten conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales [1].

Los materiales se clasifican como compuestos cuando cumplen las siguientes características:

- Están formados por dos o más componentes visibles físicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la suma de las propiedades de sus componentes.

La mayor parte de materiales compuestos están formados por dos fases:

- **La matriz**, componente que se presenta en fase continua y actúa como ligante rodeando las demás fases (fases dispersas). Transmite los esfuerzos al agente reforzante. Protege y da cohesión al material.
- **El refuerzo**, en fase discontinua, que es el elemento resistente. Su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material.

Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de sus fases constituyentes, de sus propiedades relativas y de la geometría de las fases dispersas, es decir, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas de la fase dispersa.

Los materiales compuestos se pueden clasificar en función de la fase dispersa y en función de la matriz.

- Clasificación basada en la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa:
  - Compuestos reforzados con partículas.
  - Compuestos reforzados con fibras.
  - Compuestos estructurales.
  
- Clasificación basada en la naturaleza de la matriz:
  - Compuestos de matriz metálica (MMC).
  - Compuestos de matriz cerámica (CMC).
  - Compuestos de matriz polimérica (PMC).

Estos últimos son los de mayor importancia tecnológica, principalmente cuando están reforzados con fibras. Así hay diferentes acrónimos como: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), BFRP (Boron Fiber Reinforced Plastic), GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic), AFRP (Aramid Fiber Reinforced Plastic).

El material utilizado en los Fórmula 1 es un polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). La principal aplicación es la fabricación de materiales compuestos con polímeros termoestables. El polímero utilizado es la resina epoxi.

Las resinas epoxi son las más comunes por las ventajas que presentan: mayor resistencia, menores modificaciones en la etapa de curado, mejor adherencia a las fibras, y se pueden utilizar a temperaturas más altas que las resinas de poliéster.

Los CGRP son muy útiles para aplicaciones donde los factores críticos son la rigidez, resistencia y bajo peso pero donde el precio es un factor secundario. Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil.

En términos de fuerza, las fibras (responsables de las propiedades mecánicas) sirven para resistir la tracción, la matriz (responsable de las propiedades físicas y químicas) para resistir las deformaciones, y todos los materiales presentes sirven para resistir la compresión.

## **5.2 Fibra de carbono**

La estructura atómica de la fibra de carbono se basa en láminas de átomos de carbono ordenados en un patrón regular hexagonal. La fibra de carbono es un material amorfo, es decir, las láminas de átomos de carbono se colocan al azar. Esta integración de las láminas de carbono es responsable de su alta resistencia [2].

La densidad de la fibra de carbono es de  $1.750 \text{ kg/m}^3$ . Es conductor eléctrico y de baja conductividad térmica. Al calentarse, un filamento de carbono se hace más grueso y corto.

En determinadas aplicaciones en las que la fibra de vidrio presenta una rigidez insuficiente, es necesario sustituirla por fibras de carbono (la gran diferencia de precio debe estar justificada).

### 5.2.1 Propiedades

Las propiedades principales de este material son:

- Elevado módulo de elasticidad y resistencia a tracción.
- No presenta plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico.
- Baja densidad.
- Elevada resistencia a las altas temperaturas (a temperaturas del orden de los 1500–2000 °C presenta un incremento de sus prestaciones).
- Coeficiente de dilatación térmica lineal prácticamente nulo.
- Elevada resistencia a las bases.
- Buena conductividad eléctrica y térmica.
- Elevado coste de producción.
- Baja resistencia al impacto de baja energía.
- Produce diferencias de potencial al contacto con los metales, lo que puede favorecer corrosiones.

Existen dos tipos de fibras de carbono: de alto módulo de elasticidad (AM) y de alta resistencia (AR).

- Alto módulo de elasticidad (AM): su módulo de elasticidad es de 300 GPa y su módulo de resistencia a la tracción es de 700 MPa.
- Alta resistencia (AR): el módulo de elasticidad es de 140 GPa y su resistencia a la tracción es de 1.500 MPa.

Ambas fibras resisten elevadas temperaturas (del orden de 1.500-2.000 °C) y son cuatro veces más flexibles que las mejores aleaciones de acero y pesan una cuarta parte.

### 5.2.2 Fabricación de la fibra de carbono

Se fabrican mediante pirolisis controlada a partir del precursor poliacrilonitrilo (PAN) y el alquitrán. PAN es una fibra formada por largas cadenas de moléculas de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno.

El procesado sigue varias etapas:

- **Estabilización.** Las fibras de PAN son sometidas a 200-300 °C, mientras son estiradas para alinear la red internamente y alargadas en un horno de oxidación, para darles la orientación molecular requerida, la necesaria para la estabilidad dimensional, y evitar que se fundan en el siguiente proceso de carbonización.
- **Carbonización a temperaturas superiores a 1.000 °C en atmósfera inerte.** Las fibras de PAN ya estabilizadas son pirolizadas (por calentamiento) hasta que se transforman en fibras de carbono, por la eliminación de O, H y N de la fibra original. Los anillos hexagonales de carbono puro se orientan a lo largo de la longitud del hilo.  
El resultado es que aumenta la resistencia a la tracción de este material debido a que durante el tratamiento de carbonización se constituye en el interior de cada fibra unos filamentos o bandas de esqueletos estratificados como el grafito.
- **Grafitización:** es un calentamiento por encima de 2.000°C, el tamaño de los cristales de carbono aumenta, y mejora la orientación de los anillos en la fibra. Se utiliza si se necesita aumentar el módulo elástico a expensas disminuir un poco la resistencia a la tracción. En esta etapa se transforma casi todas las fibras a estructura grafito y aumentan su grado de orientación.

- **Catalizador de superficie:** finalmente a la fibra se le aplica un producto catalizador, que promueve la adhesión de la fibra a la resina.
- **Roving:** los filamentos individuales de carbono, llamados mechas, de un diámetro de 5-8 micras, son trenzados entre sí, en grupos de 5.000-12.000 mechas, y forman el roving. También se forman roving en conjuntos de 120.000- 140.000 filamentos, para formar la tela de carbono.

Para la fabricación de CFRD se combina un tejido de hilos de carbono, el cual proporciona flexibilidad y resistencia, con una resina termoestable, matriz, comúnmente de tipo epoxi. Esta resina se solidifica gracias a un agente endurecedor que une las fibras. El agente de curado ayuda a convertir la resina en un material compuesto duro. Hay diversos procesos de impregnación, industrialmente se utiliza la transferencia de resina, inyección e infusión, pero también existe el trabajo manual con pistolas, brochas o espátulas.

Los procesos de impregnación de las resinas pueden ser industriales (transferencia, inyección e infusión) o de forma manual (con brochas, espátula o pistola).

Los métodos de fabricación son:

- **Transferencia de resina (RTM)** y sistema de inyección. Se introduce resina a presión en un molde precalentado que contiene el tejido de carbono.
- **Infusión (RTI).** Se realiza colocando la resina semidura y el tejido de carbono en un molde, los cuales se combinan con calor y vacío, para finalizar el proceso se realiza el curado o polimerización ya sea a temperatura ambiente, con calor o al vacío.
- **Rollos** de fibra de carbono con la resina previamente impregnado llamados Prepeg, los cuales se curan en hornos a altas temperaturas durante varias horas.
- Fibra en **cinta**, que se puede curar a temperatura ambiente.

De la combinación de estas técnicas se obtienen las propiedades mecánicas del nuevo material. Aunque la malla de hilos de carbono constituye por sí sola un elemento resistente, necesita combinarse con la resina, para que la proteja de factores externos. Hay que resaltar que según la orientación del tejido, la tela de carbono puede ser más fuerte en una dirección determinada, o igualmente fuerte en todas direcciones. Las fibras ofrecen las mejores propiedades cuando se entretajan en la dirección de las tensiones, es decir, deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza externa.

### **5.3 Flexibilidad en los alerones**

La elasticidad de los materiales empleados y el diseño son críticos en el ámbito de la eficiencia.

El morro de un Fórmula 1 es un componente que puede ser considerado como un sólido rígido. Debido a la normativa, se descarta la existencia de piezas móviles y se llega simplemente a una deformación elástica del material.

Para analizar mejor el comportamiento del alerón delantero, se estudiarán algunas propiedades y características del material del que se fabrica este componente y gran parte de la carrocería, resina epoxi reforzada con fibra de carbono.

La resina epoxi reforzada con fibra de carbono es un material muy utilizado en la Fórmula 1. Posee elevada rigidez, bajo peso y buenas propiedades mecánicas, los cuales son perfectos para esta aplicación. Pertenece a la familia de los materiales compuestos y destaca su fragilidad. Debido a esta

característica, no dispone de zona de deformación permanente. Para explicar las deformaciones se introducirán los tipos que existen.

- **Deformación elástica o temporal.** Es aquella en la que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.
- **Deformación plástica o permanente.** Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

La separación entre ellas dos es un punto y se conoce como el límite elástico.

En el caso del alerón, éste sufre una deformación elástica, es decir, se deforma en función del esfuerzo al que es sometido y al dejar de aplicarlo vuelve a su estado original. En el siguiente gráfico de esfuerzo-deformación se pueden apreciar las dos zonas. La zona lineal es la parte elástica y la zona plástica o de deformación permanente la zona curvada. El final de la curva es el punto donde el material se rompe. Como la fibra de carbono no dispone de zona plástica, el punto de rotura está situado al final de la zona elástica.

La resina epoxi reforzada con fibra de carbono tiene una curva similar a ala del material frágil.

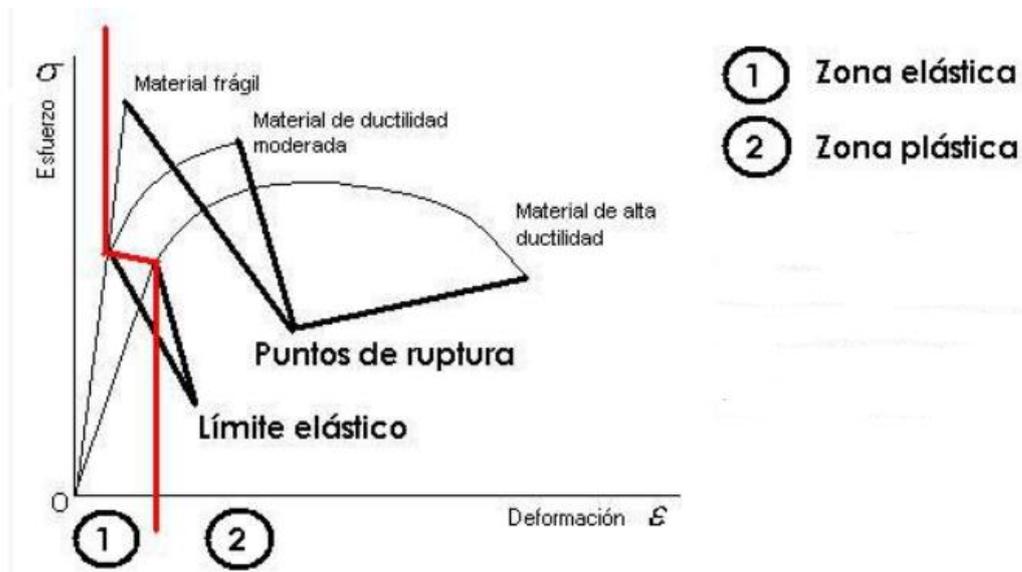


Fig 76. Gráfico esfuerzo – deformación. [2]

Los ingenieros experimentan con la zona de deformación elástica para conseguir avances en sus diseños. Para ello existen diferentes opciones:

- **Variar la disposición de las fibras.** Según se coloquen (horizontal o verticalmente) dotan a la pieza de más flexibilidad o más rigidez.
- **Variar la composición del material de fabricación.** El objetivo sería obtener una curva esfuerzo-deformación más adecuada a sus necesidades, es decir, hacen variar la pendiente de la recta.
- **Intentar conseguir una curva de deformación que no sea proporcional al esfuerzo.** Con esto se podría controlar que para una determinada fuerza, es decir velocidad, se obtuviese una deformación acentuada.

Una vez analizados los materiales utilizados, las funciones del alerón delantero y la flexión de sus materiales, se expondrán los resultados que produce este efecto en las carreras.

Por un lado, al reducirse la distancia con el suelo, el alerón es capaz de **generar más carga aerodinámica**.

Al flexionarse el alerón, se reduce la distancia entre el morro y el suelo, lo que provocará más cantidad de flujo de aire por la parte superior y menos por la parte inferior. Al circular menor cantidad de aire por la parte inferior, ésta deberá ir a mayor velocidad, aumentando como consecuencia el efecto suelo que genera el vehículo. Además, las derivas laterales se sitúan rozando el suelo, lo que permiten un mejor sellado entre la alta presión que hay sobre el alerón y la baja presión que hay debajo de él.



Fig 77. Alerón flexible. [9]

La carga aerodinámica del alerón aumentará debido al mayor flujo de aire que circula a través de él. Este aumento de carga en el tren delantero afecta a la forma de pilotaje, disminuyendo la tendencia del monoplaza de entrar en subviraje.

En general, esta flexión de los materiales produce un beneficio principal: aumenta la velocidad de paso por curva. Este efecto será proporcional a la velocidad del vehículo, por lo tanto en curvas rápidas obtendrán el máximo beneficio.

Por otro lado, mediante la deformación de determinados elementos que conforman el alerón delantero (flaps, cascades), se puede conseguir **reducir el drag para ganar velocidad punta** en las rectas.

Este efecto también tiene consecuencias negativas. Actualmente los alerones delanteros están cargados de apéndices aerodinámicos para distribuir mejor el aire por las diferentes partes del coche. Están situados y posicionados cuidadosamente para conseguir los beneficios deseados, pero al deformar el alerón, éstos cambian su posición respecto al coche y, por lo tanto, su funcionamiento y eficiencia.

La FIA ha intentado endurecer los tests de flexión para evitar que los equipos se beneficiasen de dicho efecto.

### 5.3.1 Problemática

En 2009 Red Bull fue el primer equipo implicado en este efecto, al apreciarse en las imágenes de las cámaras on-board que los extremos del alerón, donde se sitúan los endplates, se acercaban al suelo a medida que el coche aumentaba su velocidad.

Sin embargo, el vehículo pasaba el test de flexión, que consistía en aplicar una carga de 50 kilogramos sobre el plano principal del alerón, que no debía ceder más de 10 milímetros. Como medida, la FIA actuó en 2010 doblando la carga y también la flexión permitida, donde el equipo de Red Bull siguió pasando los tests de manera satisfactoria.

Uno de los métodos por el que se conseguía esta flexión era el tipo de estratificado de la fibra de carbono con la que se elabora el alerón delantero. Las piezas de fibra de carbono se construyen formando capas y la forma en la que se colocan dichas capas hace variar notablemente la rigidez y la elasticidad de la pieza, que puede llegar a tener características muy distintas en distintas partes de la misma.

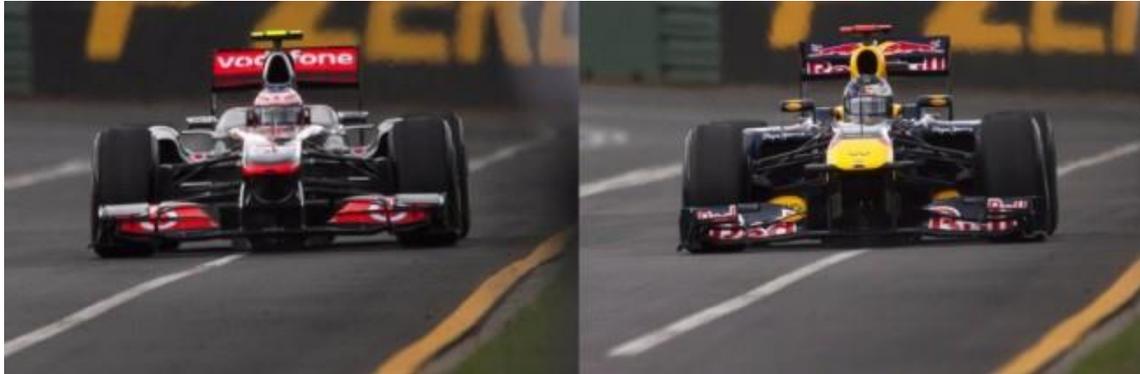


Fig 78. Comparativa de flexión entre el McLaren y el Red Bull de 2010. [GP Library]

Una pieza construida con fibra de carbono puede llegar a diseñarse para que no ceda a la flexión en el centro de plano principal pero sí en los extremos, o que lo haga en mayor o menor medida en función de la temperatura o el sentido de la carga aplicada (vertical, horizontal). Además los equipos idearon nuevos elementos que permitieran más variables.

Como la Fórmula 1 es un negocio multimillonario, los investigadores continuarán explorando nuevas maneras de mejorar los materiales existentes utilizados, ya que existe gran competencia y provoca que cualquier avance en la estructura o en los materiales de un vehículo de F1 signifique enormes beneficios para el equipo.



## 6 DISEÑO

### 6.1 Diseño 3D

El alerón delantero es uno de los componentes más influyentes y complicados de un Fórmula 1; es el primero que contacta con el flujo de aire y condiciona la trayectoria del flujo de aire hacia el resto del vehículo. Sus dos misiones fundamentales, como ya se ha citado anteriormente, son la de desviar aire que va hacia las ruedas (ya que éstas proporcionan una gran parte de la resistencia total del vehículo) y proporcionar carga aerodinámica. Otro aspecto importante del alerón delantero es la trayectoria del flujo tras pasar por él y cómo afecta el resto del vehículo, ya que inicia el desvío de aire encargado de la refrigeración de los frenos y el motor, el flujo de aire sobre el casco y sobre el alerón trasero. Debido a todo esto es importante la realización de un diseño que se ajuste a las normativas vigentes y que cumpla su función aerodinámica.

Tras haber explicado los fundamentos teóricos, los principales elementos aerodinámicos y la necesidad de la utilización de un alerón delantero en Fórmula 1, se procederá a realizar el diseño del mismo. En este proyecto se ha utilizado el software de diseño Catia V5 para la realización del modelo 3D mediante superficies.

En primer lugar, el proceso para la realización del diseño del alerón se ha basado en la búsqueda de la normativa de la Fórmula 1.

#### ***Regulaciones técnicas de los alerones delanteros de Fórmula 1 – 2017 [3].***

- Se produce un aumento en la longitud total, pasando de 1650 mm en 2016 a 1800 mm en 2017.
- No es totalmente perpendicular respecto a la línea central del coche sino que forma un ángulo de 12.5 grados. El Y250 debe tener un ángulo de 12.5° respecto al eje transversal.
- La zona neutral (libre de flaps) se mantiene en 500mm para evitar que se rompa el vórtice del Y250.
- El grosor y forma de los flaps se ha restringido.
- Se produce un aumento de la flexión máxima permitida en los test, los elementos principales (la zona del cajetín) han aumentado en 5° los límites de tolerancia (ahora 15° o 15 mm) a la resistencia de 1.000 Newtons, y los secundarios (en la zona de los flaps) pueden flexionar ahora 5° o 5 mm (antes 3°) a la carga de 60 Newtons.

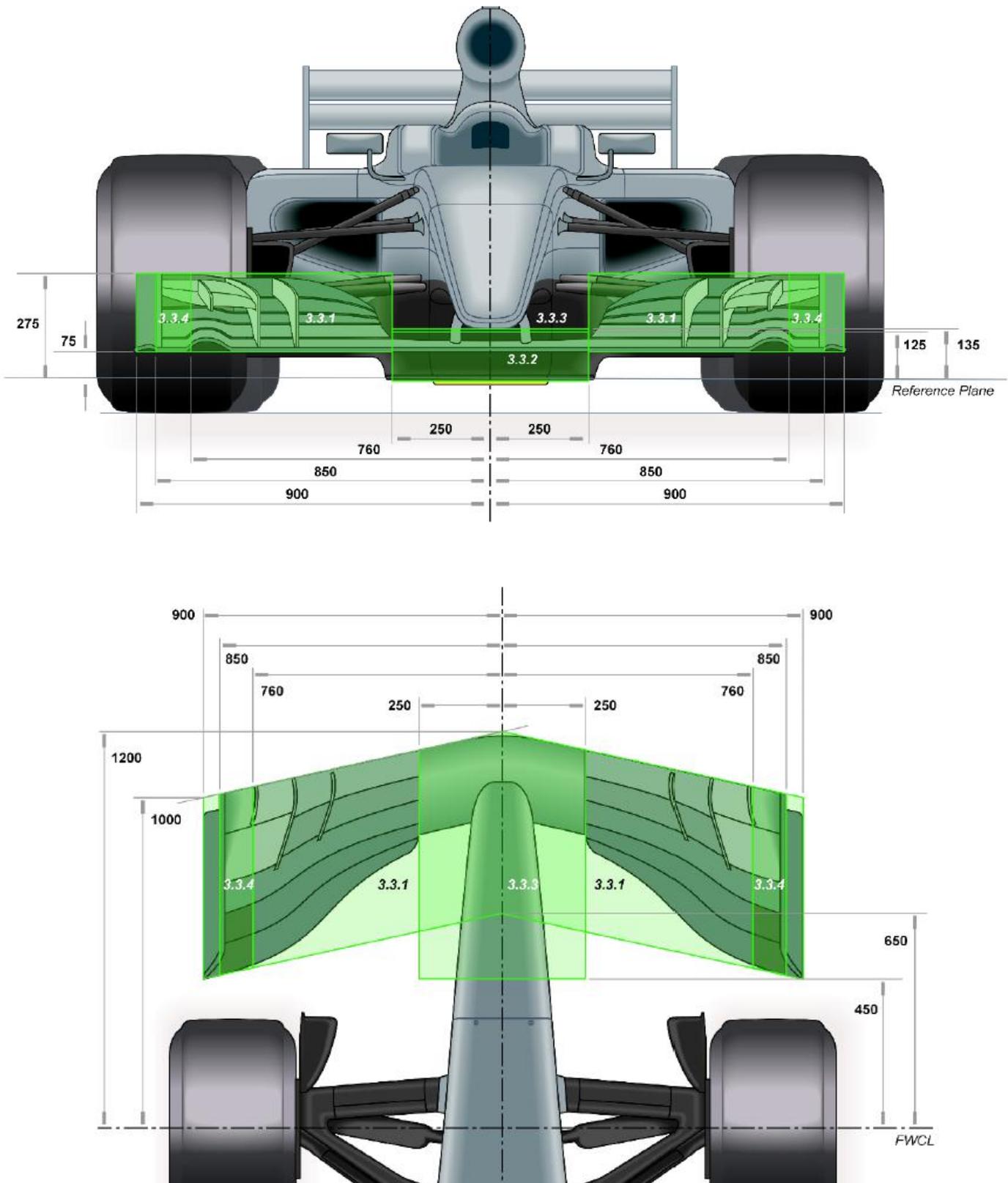


Fig 79. Dimensiones del alerón delantero de F1 2017. [3]

Estos datos han permitido una primera visión del componente y unas limitaciones en cuanto a las dimensiones fijas establecidas por la FIA.

El diseño inicial se realizará con las limitaciones establecidas: una anchura total de 1800 mm, una longitud de 750 mm y una altura de 200 mm. En la siguiente imagen se muestra el inicio del diseño de la parte izquierda.

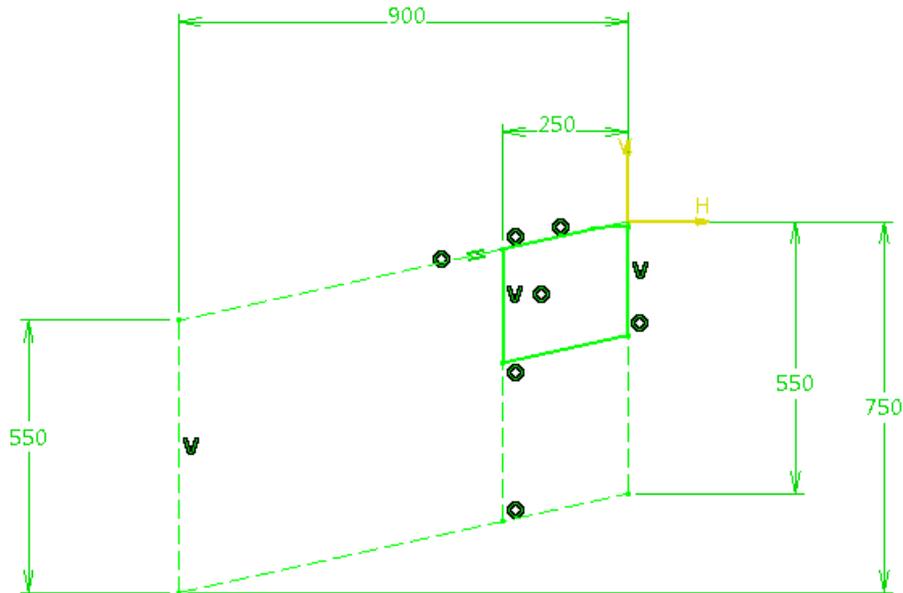


Fig 80. Dimensionamiento inicial en Catia. [Elaboración propia]

Posteriormente, tras realizar las limitaciones del volumen del componente se han diseñado las diferentes partes analizando distintos alerones de diferentes equipos de Fórmula 1 del 2017. Primero se ha construido la parte central, la cual posee una anchura de 250 mm a cada lado del eje central, además de tener cierto grado de inclinación y no ser completamente paralela al eje transversal del vehículo.

A continuación se ha desarrollado el plano principal y se han colocado los generadores de vórtices en el punto indicado por las regulaciones de la FIA.

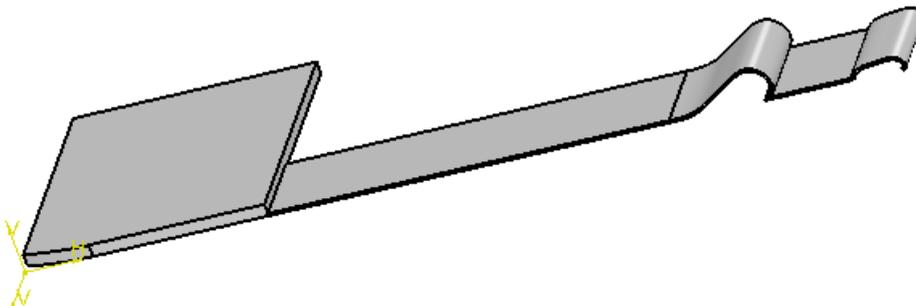


Fig 81. Plano principal del alerón en Catia. [Elaboración propia]

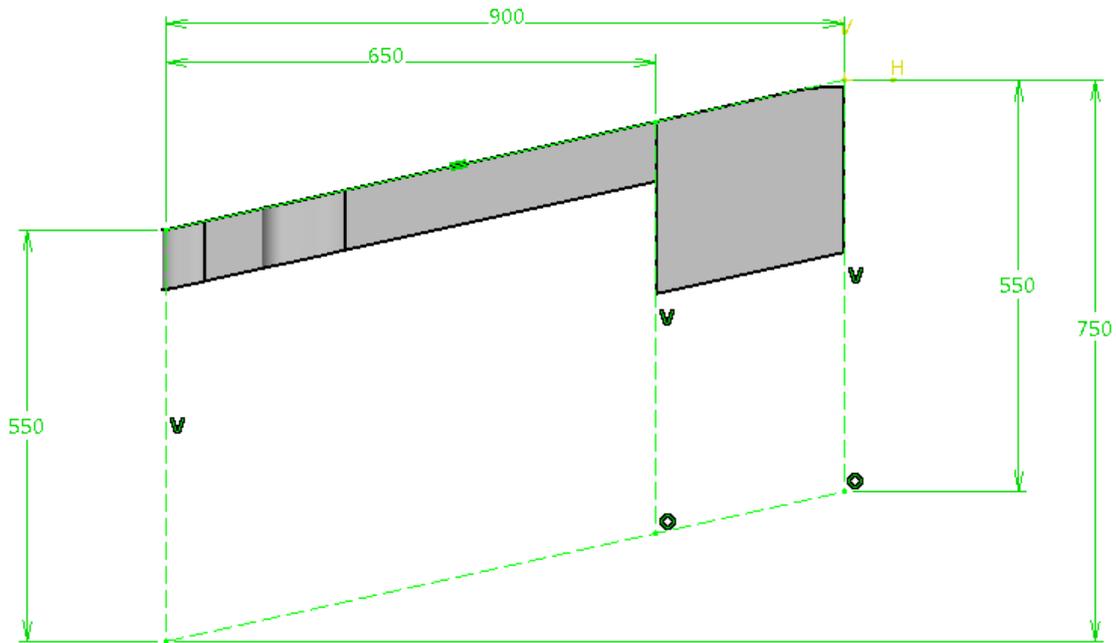


Fig 82. Plano principal y dimensiones en Catia. [Elaboración propia]

Se han diseñado cinco perfiles, los cuales van aumentando el grado de curvatura y su altura, siendo los primeros de menor inclinación que los más traseros.

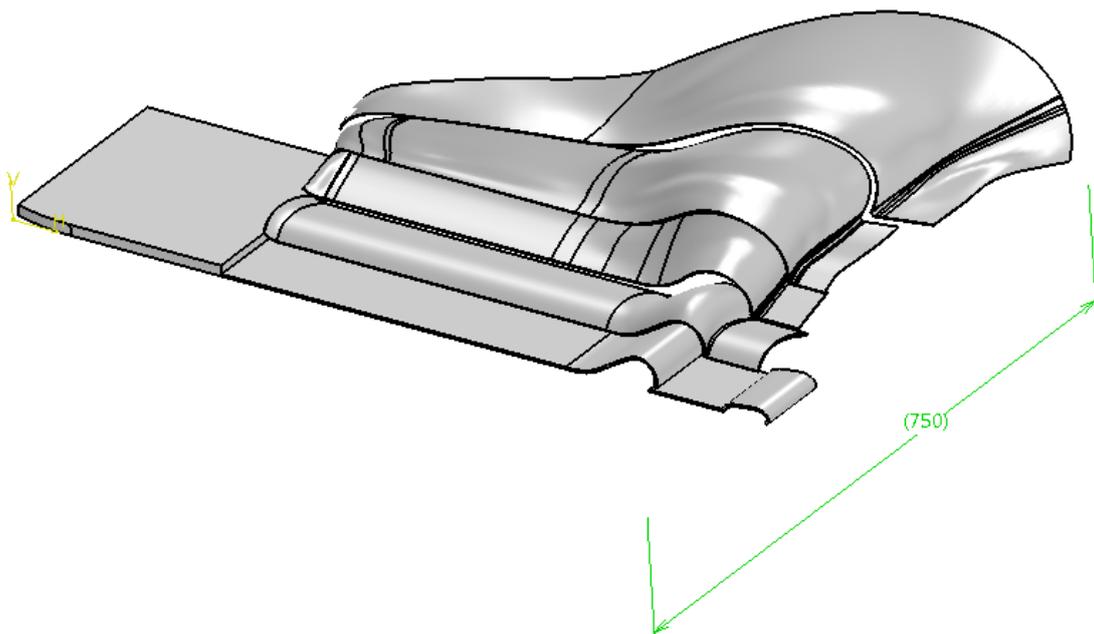


Fig 83. Perfiles del alerón de F1 en Catia. [Elaboración propia]

Tras la construcción de los distintos perfiles, se ha realizado el endplate y el footplate, además de incluir una serie de elementos aerodinámicos de menor tamaño.

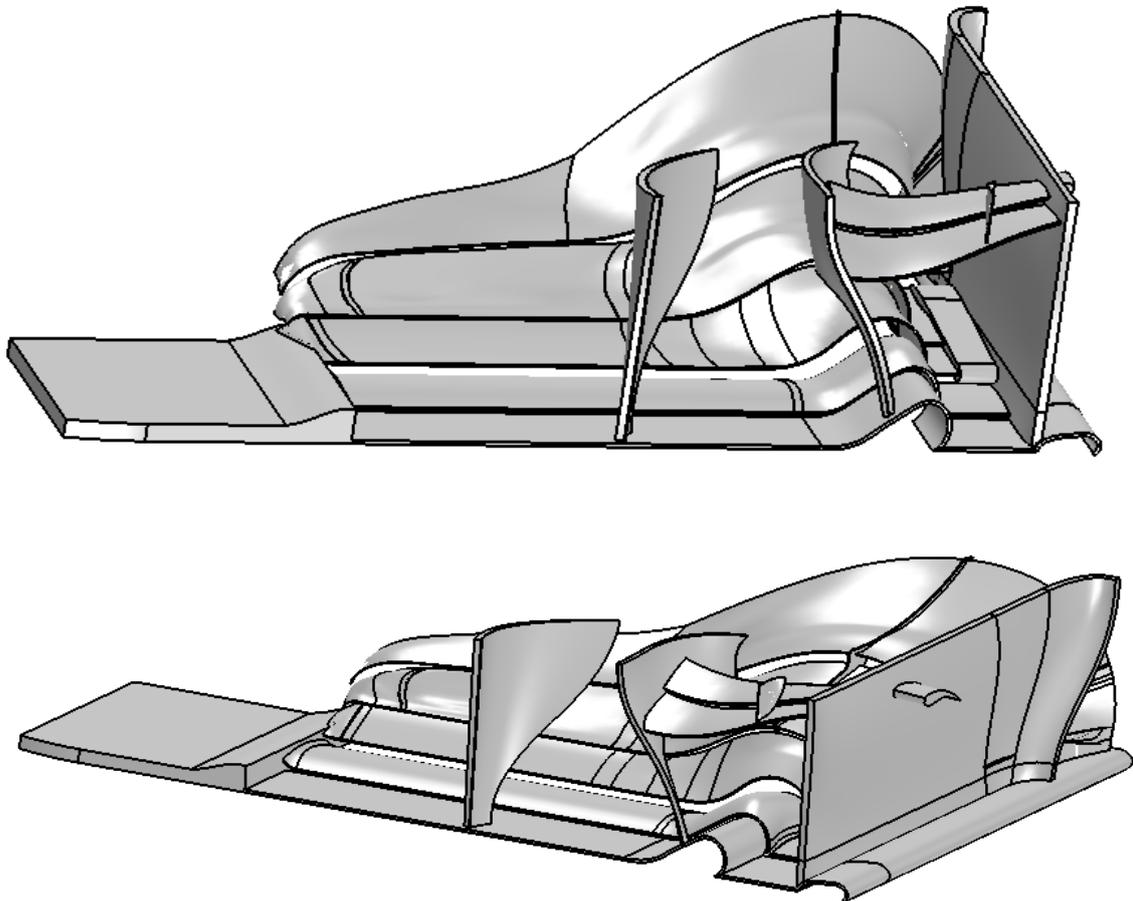


Fig 84. Parte izquierda del alerón delantero en Catia. [Elaboración propia]

Tras realizar un lado del alerón se construye el componente completo mediante simetría. Por último, para acabar el diseño se cambia la forma de los bordes y los extremos de las superficies, para así tener una mejor aerodinámica global.

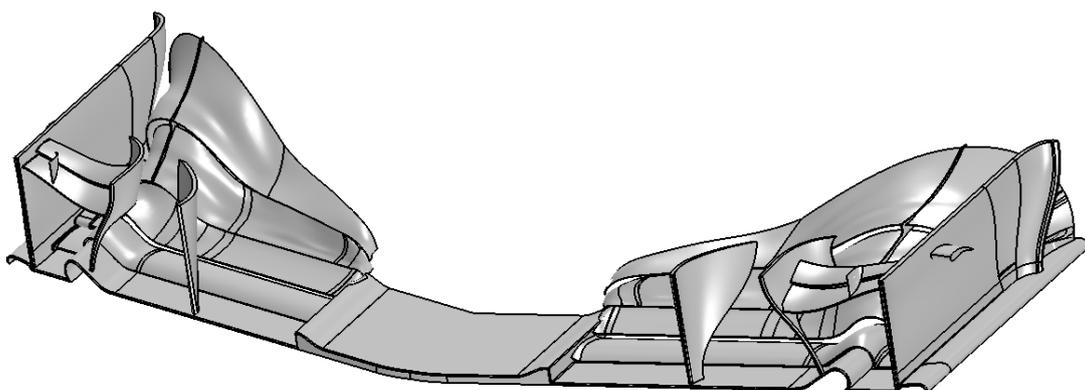


Fig 85. Diseño del alerón delantero de F1. [Elaboración propia]

## 6.2 Test de flexión

### 6.2.1 Materiales

En la actualidad los alerones están fabricados de resina epoxi reforzada con fibra de carbono. Este material posee elevada rigidez, bajo peso y buenas propiedades mecánicas. Debido a la normativa, se descarta la existencia de piezas móviles y se llega a un componente que posee una deformación elástica del material.

Para la realización de las simulaciones, se han elegido tres materiales diferentes (epoxi reforzado con fibra de carbono, epoxi reforzado con fibra de vidrio aluminio), en los cuales varían las propiedades mecánicas. En la siguiente tabla se muestran las propiedades elegidas para cada material.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales. [10]

Material	Densidad $\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	Módulo elástico $E_1/E_2$ (GPa)	Resistencia tracción $S_{t1}/S_{t2}$ (MPa)	Coefficiente Poisson $\nu$
Fibra de carbono - Epoxi	1.54	127/9.0	1447/62	0.25
Glass - Epoxi	1.80	39/4.8	1130/96	0.3
Aluminio	2.71	7	95	0.346

Una vez seleccionados los materiales con los cuales se desarrollará el alerón delantero, es posible calcular su masa total, conocidos ciertos parámetros:

- Volumen: 0.006 m<sup>3</sup>
- Área: 2.48 m<sup>2</sup>

Tabla 3. Masa total de los alerones según el material. [Elaboración propia]

	Carbono - Epoxi	Glass – Epoxi	Aluminio
Masa (Kg)	9.162	10.708	16.122

### 6.2.2 Simulación

En la Fórmula 1 se realizan ciertos test sobre los alerones delanteros para controlar la flexibilidad de los materiales y con ello la generación de downforce adicional. La normativa establece lo siguiente:

- Al aplicar una fuerza de 1000 N sobre el plano principal, se permite una flexión máxima de 15 mm.
- Al aplicar una fuerza de 60 N en la zona de los flaps, se permite una flexión máxima de 5 mm.

Este test se realizará mediante simulaciones en Catia con la opción Analysis & Simulation. A partir del alerón y su material se crea una malla, y posteriormente se seleccionan los apoyos y las fuerzas elegidas que vienen dadas por la normativa de la FIA.

En el primer test se aplica una carga de 1000 Newtons sobre el plano principal del alerón, y en el segundo test, una carga de 60 Newtons sobre los laterales del alerón, como puede observarse en la siguiente imagen.

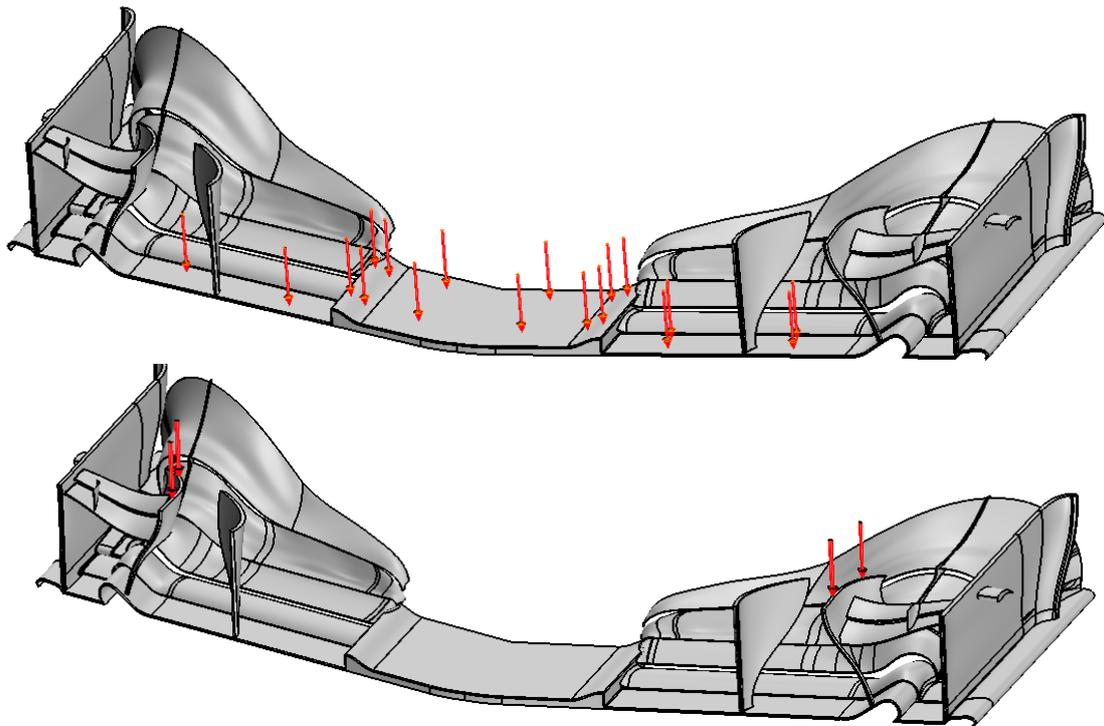


Fig 86. Test de flexión de 1000N (arriba) y de 60N (abajo). [Elaboración propia]

Tras la realización de las simulaciones, aplicando las fuerzas sobre las distintas zonas del alerón, se han obtenido los resultados del desplazamiento que experimentan sus componentes dependiendo del material seleccionado.

### Epoxi reforzado con fibra de carbono

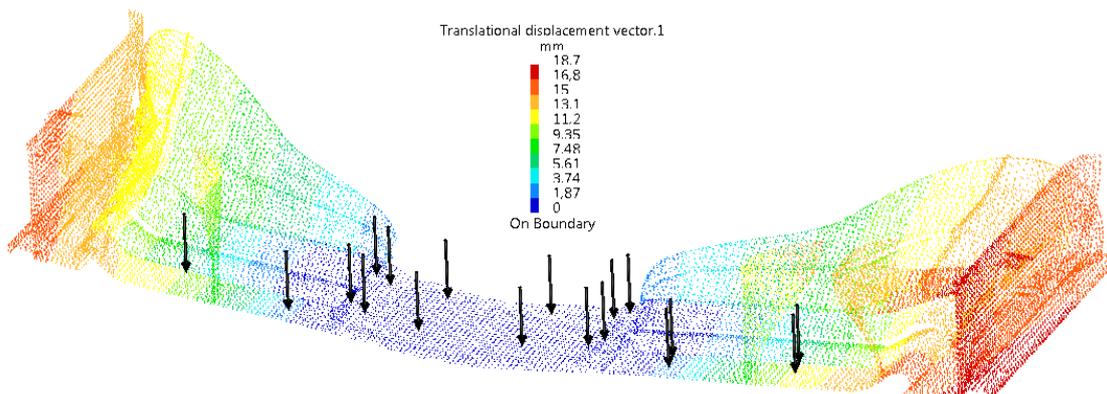


Fig 87. Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de carbono. [Elaboración propia]

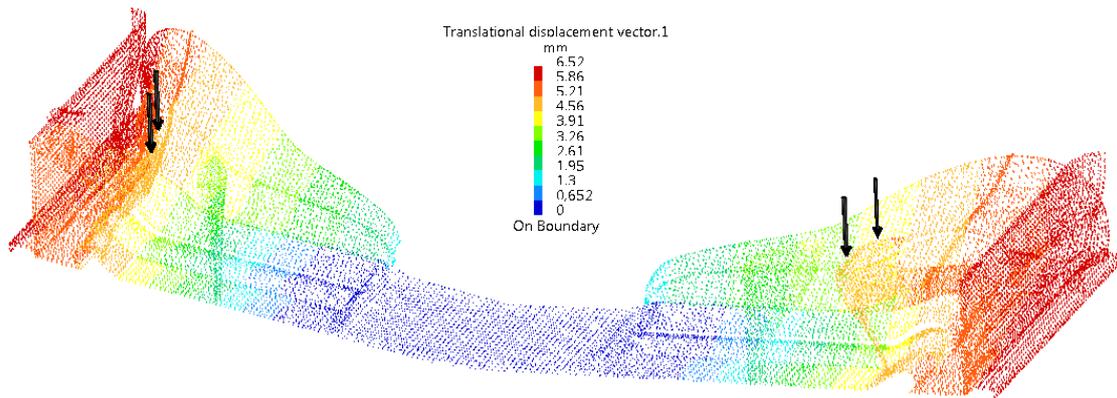


Fig 88. Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de carbono. [Elaboración propia]

### Epoxi reforzado con fibra de vidrio

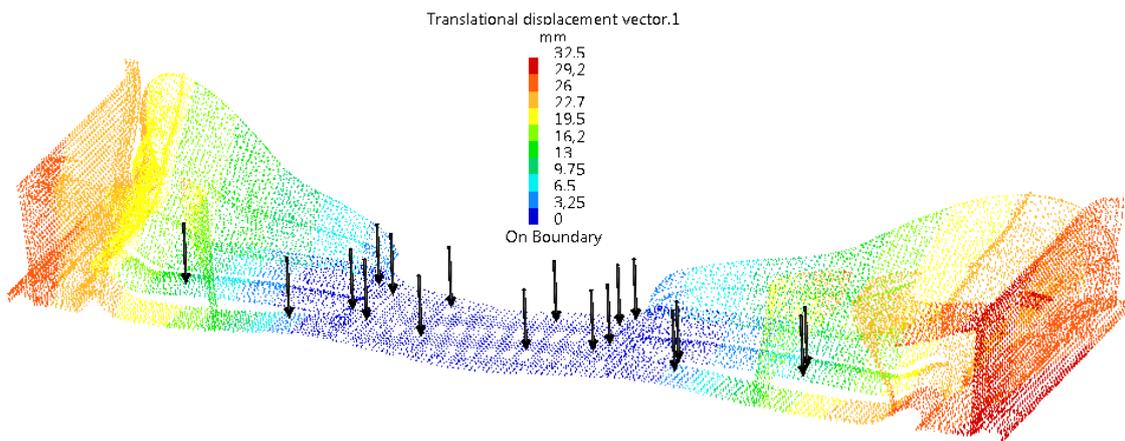


Fig 89. Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de vidrio. [Elaboración propia]

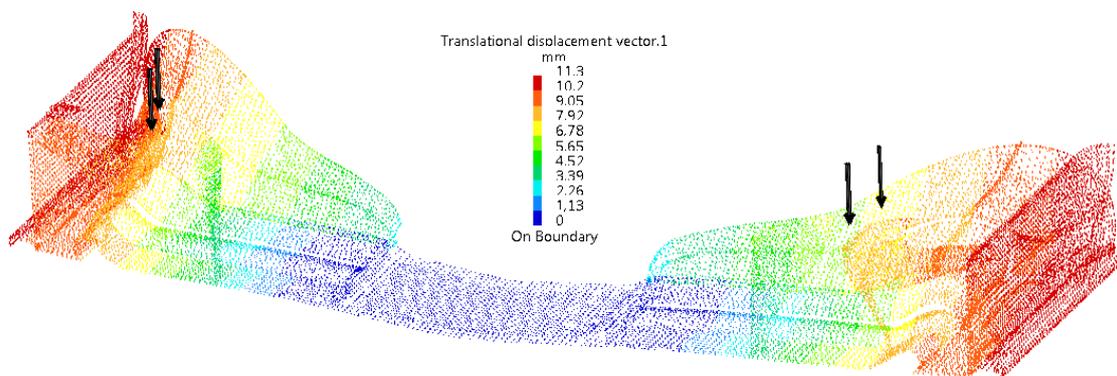


Fig 90. Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de vidrio. [Elaboración propia]

## Aluminio

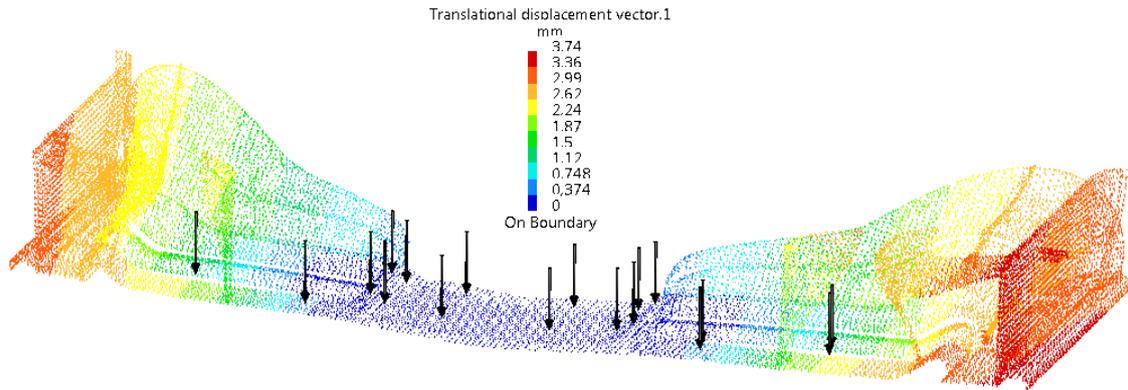


Fig 91. Test de flexión de 1000N sobre el alerón de aluminio. [Elaboración propia]

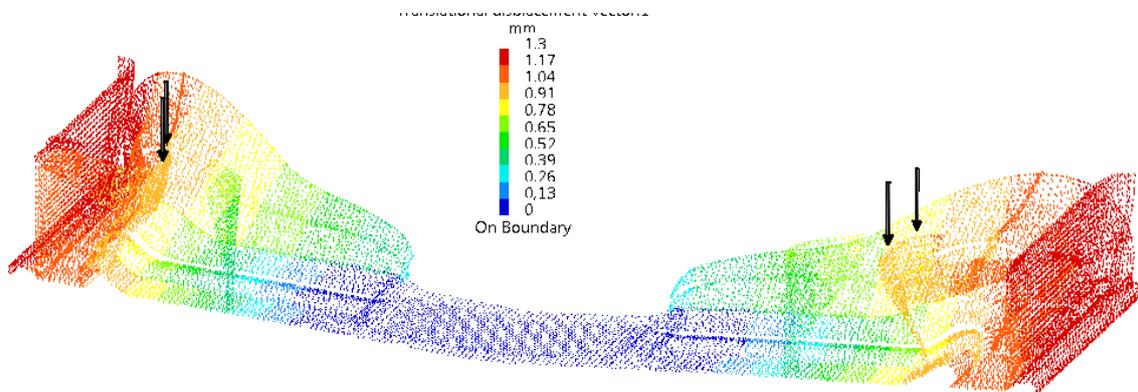


Fig 92. Test de flexión de 60N sobre el alerón de aluminio. [Elaboración propia]

Tras analizar los resultados obtenidos, se observa que sólo cumple las limitaciones impuestas por la FIA el alerón de aluminio, mientras que el de fibra de carbono supera por poco los límites y el de fibra de vidrio los sobrepasa de una manera mucho mayor, haciendo que este material sea descartado inicialmente.

Como el material de fibra de carbono varía dependiendo de las propiedades de las fibras y de su orientación y dado que los test de flexión con este material no han sido muy negativos, se desarrollará otro material a partir de éste, haciendo variar mínimamente alguna de sus propiedades.

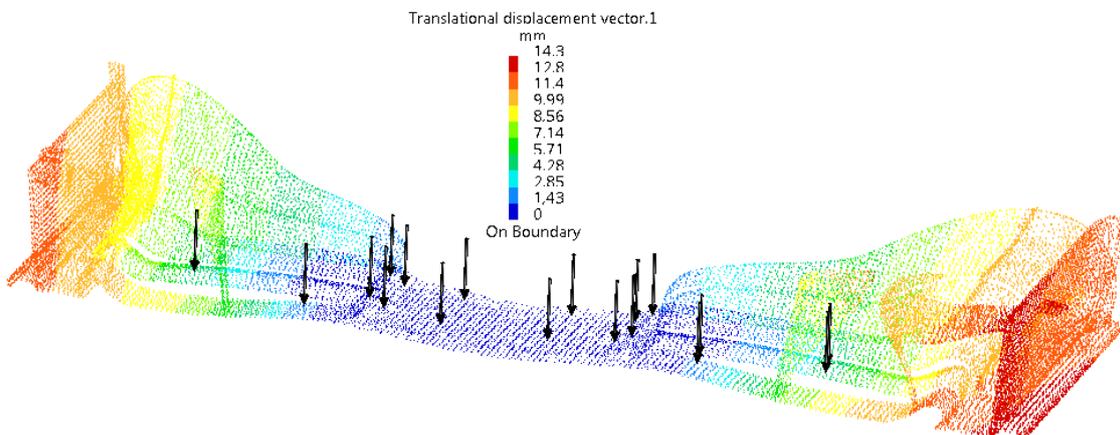


Fig 93. Test de flexión de 1000N sobre el alerón de fibra de carbono modificado. [Elaboración propia]

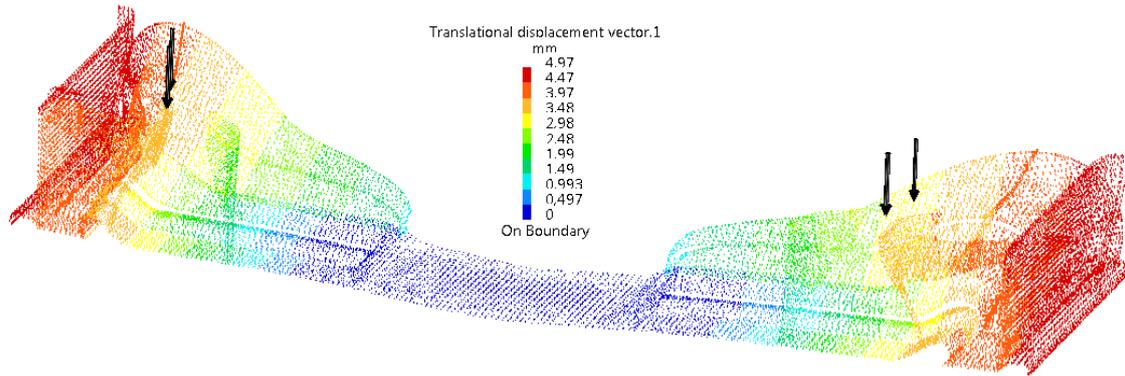


Fig 94. Test de flexión de 60N sobre el alerón de fibra de carbono modificado. [Elaboración propia]

El nuevo material de epoxi reforzado con fibra de carbono ha permitido someter al material a las cargas y cumplir los límites de los valores de desplazamientos. Este material presenta las mismas propiedades que el anterior de epoxi-carbono, modificando sólo el módulo elástico a un valor un poco mayor,  $1,85 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> en lugar de  $1,41 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>.

A partir de los datos obtenidos, el material elegido para el alerón delantero será el de epoxi y fibra de carbono modificado. A continuación se incluyen los test de flexión de este material, en los cuales se puede analizar mejor la posición inicial, la final y los desplazamientos de los elementos del alerón, obteniendo que se cumple la normativa.

### Test de flexión – 1000N (Límite 15 mm)

El desplazamiento máximo obtenido ha sido 14.3 mm.

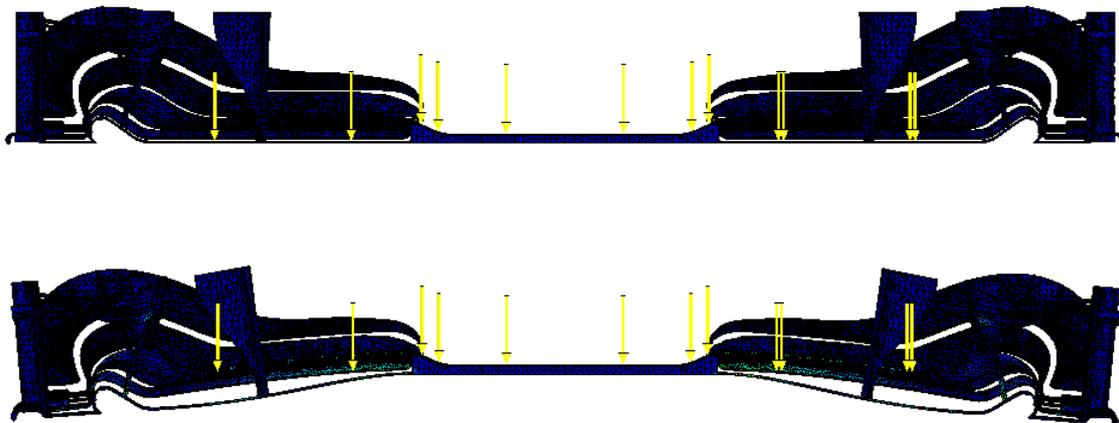


Fig 95. Comportamiento del alerón de F1 de fibra de carbono modificado ante el test de flexión de 1000N. [Elaboración propia]

**Test de flexión – 60N (Límite 5 mm)**

El desplazamiento máximo obtenido ha sido 4.97 mm.

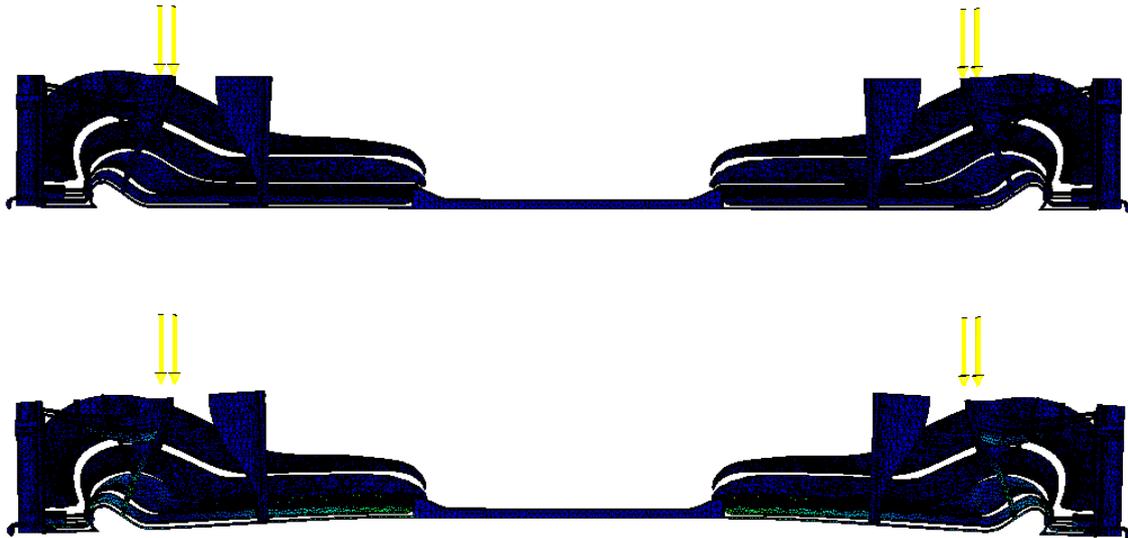


Fig 96. Comportamiento del alerón de F1 de fibra de carbono modificada ante el test de flexión de 60N. [Elaboración propia]



## 7 CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusiones

Tras la realización de las distintas partes del proyecto, tanto teóricas como prácticas, se ha llegado a diversas conclusiones sobre el diseño del alerón delantero de un Fórmula 1. Una vez presentada la teoría aerodinámica y los diferentes elementos del alerón, es posible determinar su diseño 3D.

El alerón delantero es el elemento principal sobre el que se basa el equilibrio aerodinámico del Fórmula 1, debido a que es el primer componente del vehículo en contactar con el flujo de aire. Sus funciones principales son la generación de carga aerodinámica y la distribución del flujo de aire a través del vehículo.

Cada equipo tiene un diseño propio de alerón delantero que está condicionado por las características del vehículo, la conducción del piloto y el circuito. Además es posible la modificación de la flexibilidad del alerón, aunque está limitado por la normativa de la FIA. Esto permite que los flaps puedan comportarse de forma diferente, ofreciendo mayor carga aerodinámica en las curvas y menor resistencia al viento en las rectas.

En la actualidad están contruidos de resina epoxi reforzada con fibra de carbono, lo que les confiere una elevada rigidez con un peso menor. Adicionalmente, se está estudiando la obtención de materiales compuestos con una flexibilidad controlada, mediante las distintas formas de orientación de las fibras utilizadas.

Tras la búsqueda de la normativa de la Fórmula 1 establecida en 2017 para las limitaciones de las dimensiones de los elementos, se ha realizado un diseño 3D con una anchura total de 1800 mm, una longitud de 750 mm y una altura de 200 mm. Se ha desarrollado el plano principal y se han colocado los generadores de vórtices.

El alerón produce mayor carga aerodinámica al aumentar el ángulo de ataque de sus elementos aerodinámicos. Sin embargo es conveniente optimizar este ángulo y el tamaño de los elementos, ya que si se aumenta demasiado puede provocar que el flujo de aire de la parte inferior se separe, entrando en pérdida, y pierda la mayor parte de carga aerodinámica que pueda generar.

Para evitar esto, se sustituyen los elementos de gran tamaño por una serie de elementos pequeños, con lo que aparece una ranura entre ellos que permite que pase el flujo de aire bajo estos elementos y se mantenga pegado a los mismos. Por esta razón, el alerón está diseñado con cinco perfiles aerodinámicos, los cuales van aumentando el grado de curvatura y su altura, siendo los primeros de menor inclinación que los más traseros.

Finalmente se ha realizado el endplate y el footplate, además de incluir una serie de elementos aerodinámicos de menor tamaño. Estos elementos permiten dirigir el flujo de aire hacia determinadas partes del vehículo y desviar la parte que llegaría a las ruedas, mejorando así la aerodinámica y disminuyendo la resistencia generada.

En la Fórmula 1 se realizan ciertos test sobre los alerones delanteros para controlar la flexibilidad de los materiales y con ello la generación de downforce adicional.

En el primer test se aplica una carga de 1000 Newton (flexión máxima permitida de 15 mm) sobre el plano principal del alerón, y en el segundo test, una carga de 60 Newtons (flexión máxima permitida de 5 mm) sobre los laterales del alerón.

Aunque en la actualidad los alerones están fabricados de resina epoxi reforzada con fibra de carbono, para la realización de las simulaciones, se han elegido tres materiales (epoxi reforzado con fibra de carbono, epoxi reforzado con fibra de vidrio aluminio), en los cuales varían las propiedades mecánicas, lo que ha permitido estudiar el comportamiento al variar ciertos parámetros.

En las simulaciones realizadas aplicando cargas sobre distintas zonas del alerón (según la normativa establecida por la FIA), se ha observado que las menores flexiones aparecen en el componente de aluminio, seguido por el de fibra de carbono, y obteniendo unos resultados más negativos para la fibra de vidrio, ya que ha duplicado los límites de flexión permitidos.

Tabla 4. Valores del desplazamiento máximo en los test de flexión. [Elaboración propia]

	1000 N – (Límite 15 mm)	60 N – (Límite 5 mm)
	Desplazamiento	Desplazamiento
<b>Epoxi – Carbono</b>	18.7 mm	6.52 mm
<b>Epoxi – Vidrio</b>	32.5 mm	11.3 mm
<b>Aluminio</b>	3.74 mm	1.3 mm

El que mejores resultados ha presentado en cuanto a menores desplazamientos ha sido el alerón de aluminio, pero el peso del componente global no hace conveniente su utilización, ya que aumentaría el peso del vehículo, algo contrario a lo que buscan los equipos, debido a que supondría una mayor resistencia y menor velocidad punta.

Tabla 5. Masa total del alerón según el material. [Elaboración propia]

	Carbono - Epoxi	Glass – Epoxi	Aluminio
<b>Masa (Kg)</b>	9.162	10.708	16.122

Como el material de fibra de carbono-epoxi varía sus propiedades dependiendo de las características de las fibras y de su orientación y dado que los test de flexión con este material no han sido muy negativos, se ha desarrollado un nuevo material a partir de éste, haciendo variar sólo su módulo elástico. El módulo elástico o módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico y relaciona la tensión aplicada a un material con la deformación producida en él; es proporcional a la rigidez del material. Al aumentar el módulo de Young en este material, la deformación experimentada al aplicar la misma fuerza es menor.

El nuevo material creado de epoxi reforzado con fibra de carbono ha permitido someter al material a las cargas y cumplir los límites de los valores de desplazamientos establecidos por la normativa impuesta por la FIA. Por lo tanto el alerón será de este nuevo material, el cual posee elevada rigidez, bajo peso y buenas propiedades mecánicas.

Tabla 6. Valores del desplazamiento máximo en los test de flexión. [Elaboración propia]

	1000 N – (Límite 15 mm)	60 N – (Límite 5 mm)
	Desplazamiento	Desplazamiento
<b>Nuevo Epoxi – Carbono</b>	14.3 mm	4.97 mm

Debido al conjunto de las características presentadas, el diseño más adecuado sería la fabricación de un alerón de fibra de carbono, el cual presenta cierto grado de flexión (por sus propiedades mecánicas y orientación de las fibras), lo cual es una característica buscada por las escuderías para aumentar la generación de carga aerodinámica durante las carreras, ya que por las normativas establecidas el alerón no debe poseer elementos móviles. Aunque es el material elegido de mayor coste, sus propiedades justifican el precio, siendo un factor secundario en este tipo de competiciones, donde lo principal es poseer los mejores diseños y materiales para dominar en las carreras.

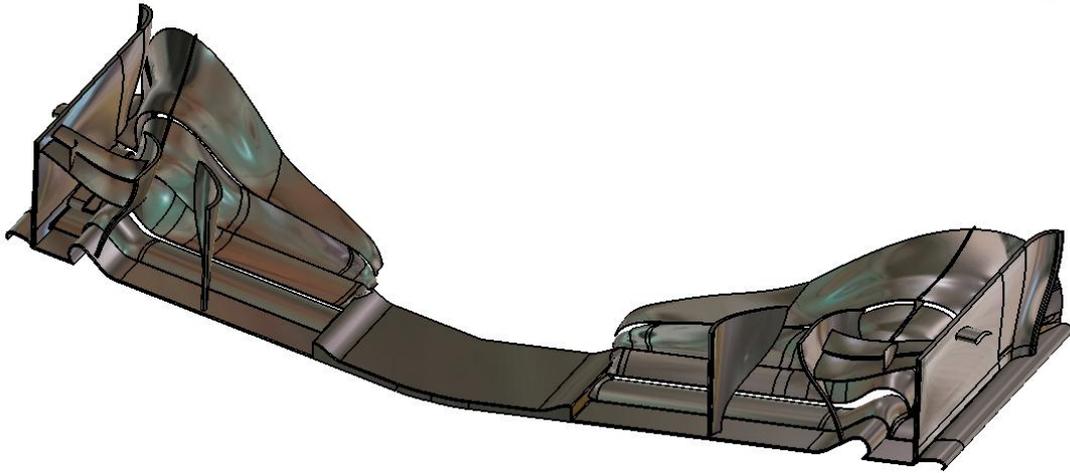


Fig 97. *Diseño final del alerón delantero de F1 en Catia. [Elaboración propia]*

## 7.2 Sugerencias para trabajos futuros

Tras la realización del presente proyecto, se propone una línea de desarrollo de posibles trabajos futuros:

- Análisis aerodinámico de un alerón mediante mecánica de fluidos computacional.
- Diseño de un alerón trasero de Fórmula 1 y realización de simulaciones.
- Impactos en la fabricación y montaje de un alerón mediante materiales compuestos, estudio de sus propiedades y procesos de producción.



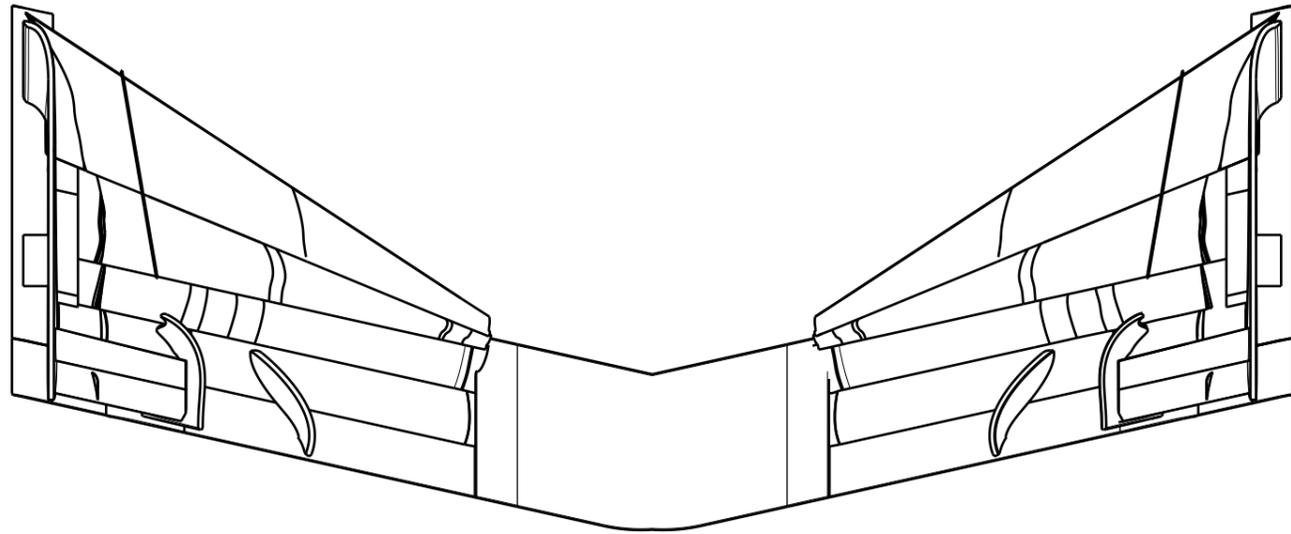
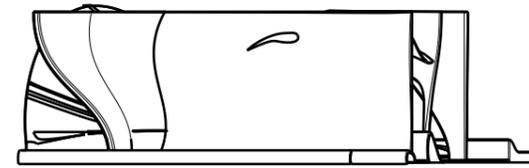
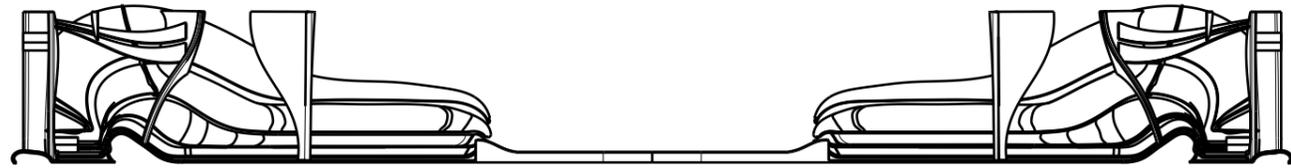
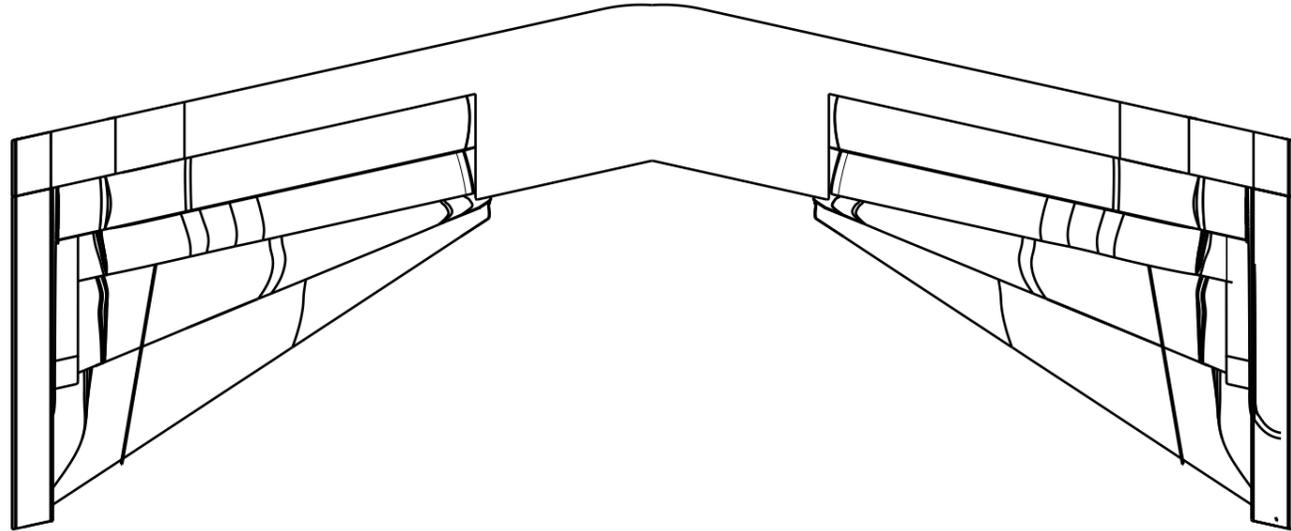
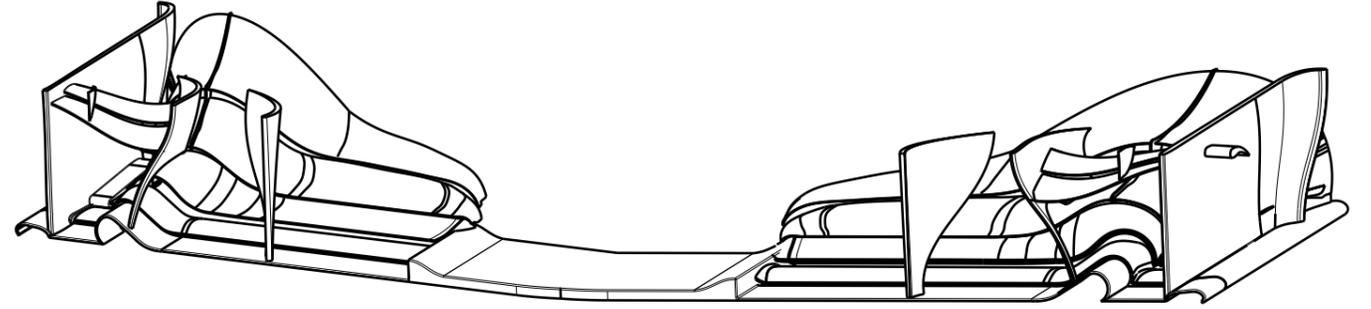
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

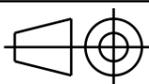
- [1] Askeland Donald. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, International Thomson, 1999.
- [2] Callister William. *Ciencia e ingeniería de materiales*, Reverte, 2002.
- [3] Fédération Internationale de l'Automobile. *Formula One technical regulations*, 2017.  
(<http://www.fia.com/regulation/category>)
- [4] Foster Frank. *A History of Formula One Racing*, BookCaps, 2013.
- [5] Franchini Sebastián, López García Óscar. *Introducción a la Ingeniería Aeroespacial*, Garceta, 2012.
- [6] Giraldo Javier. *Historia de la Formula 1*, Océano –Ámbar, 2008.
- [7] McBeath Simon. *Aerodinámica del automóvil de competición*, CEAC, 2005.
- [8] Meseguer Ruiz José, Sanz Andrés Ángel. *Aerodinámica básica*, Garceta, 2011.
- [9] Piola Giorgio. *Formula 1 Technical Analysis*, Paperback, 2016.
- [10] Reifsnider, Case. *Damege Tolerance and Durability of Material System*, Wiley, 2002.
- [11] Thomas G. *Materials Used In F1 Cars*. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8194>.  
(Junio, 2017)
- [12] Willem Toet. *What parts of a Formula 1 car generate the main aerodynamic forces?*, 2015.
- [13] Página oficial de la Fórmula 1. <https://www.formula1.com>. (Junio, 2017)



## **ANEXOS**

Isometric view  
Scale: 1:10



	Designed by	Nerea Coronado Lorenzana
	Material	Carbono - Epoxi
	Date	20/06/2017
	Tittle	Front Wing F1
SCALE		TFM
<b>1:10</b>		Máster Ingeniería Automoción
		Universidad de Valladolid

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.